

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DEL MOLISE



DIPARTIMENTO DI SCIENZE UMANISTICHE, SOCIALI E DELLA FORMAZIONE

DOTTORATO DI RICERCA IN

INNOVAZIONE E GESTIONE DELLE RISORSE PUBBLICHE

CURRICULUM: PATRIMONIO CULTURALE E SVILUPPO DEL TURISMO
XXIX CICLO

ICAR10 – ARCHITETTURA TECNICA

Applicazione della tomografia elettrica e di tecniche di rilievo tridimensionale nel Parco Archeologico di Egnazia (BR)

COORDINATORE
Prof. Massimo FRANCO

RELATORE
Prof. Agostino CATALANO

DOTTORANDA
Dott.ssa Claudia Giordano
(matr. 151606)

A.A. 2015/2016

Capitolo 1 - Il ruolo delle nuove tecnologie nell'ambito di progetti di studio e tutela dei beni culturali	6
---	----------

Capitolo 2 – Metodologie di prospezione geofisica applicate ai siti archeologici	10
2.1 Metodi passivi	11
2.1.1 Il metodo magnetico	11
2.1.2 Il metodo gravimetrico	13
2.1.3 Il metodo dei potenziali spontanei (SP)	13
2.2 Metodi attivi	14
2.2.1 Ground penetrating radar	14
2.2.2 Il metodo elettromagnetico	16
2.2.3 Il metodo sismico	16
2.2.4 Metodo della polarizzazione indotta	17
2.2.5 Metodo geoelettrico	18
2.3 Principi per una scelta metodologica	18
2.4 Il metodo geoelettrico	19
2.4.1 Il principio fisico della resistività elettrica	20
2.4.2 Configurazioni elettrodeiche	25
2.4.3 La strumentazione	31
2.4.4 Tecnica della pseudosezione e elaborazione di mappe tomografiche	33
2.4.5 Inversione dei dati	37
2.4.6 Dall'elaborazione all'interpretazione del dato geofisico	41

Capitolo 3 – Tecniche digitali di rilievo per la ricerca e documentazione Archeologica	44
3.1 L'informazione archeologica	44
3.2 Laser scanner	46
3.2.1 Strumentazione	47
3.2.2 Principi e operazioni sul campo	48
3.2.3 Trattamento dati	51
3.2.3.1 Pre-processamento delle scansioni	51
3.2.3.2 Registrazione o allineamento delle scansioni	52
3.2.3.3 Meshing	52
3.2.3.4 Mappatura della texture	54
3.2.3.5 Integrazione con dati fotogrammetrici	54
3.3 Fotogrammetria stereoscopica	55
3.3.1 Strumentazione	56
3.3.2 Principi e operazioni sul campo	57
3.3.3 Trattamento dati	59

3.3.3.1	Allineamento dei fotogrammi	59
3.3.3.2	Costruzione della geometria	59
3.3.3.3	Creazione della texture	59
Capitolo 4 – Il parco archeologico di Egnazia		60
4.1	Il sito: inquadramento storico-archeologico	61
4.1.1	Storia delle indagini archeologiche	61
4.1.2	Le fasi insediative	63
4.2	Le prospezioni geoelettriche	68
4.2.1	Le aree di indagine	81
4.2.1.1	Area 1	82
4.2.1.2	Area 2	90
4.2.1.3	Aree 3 – 4	93
4.2.1.4	Area 5	97
4.2.1.5	Aree 6 – 7	102
4.3	Il rilievo tramite laser scanner e fotogrammetria: l'area campione delle terme del foro	105
4.3.1	Acquisizione dei dati	106
4.3.2	Elaborati	111
Capitolo 5 – Esempi di applicazioni per la tutela del patrimonio culturale		124
5.1	Crotone	125
5.2	Cisterna di Latina – Sito archeologico di <i>Tres Tabernae</i>	128
5.3	Schiavi d'Abruzzo – Sito archeologico dei templi italici	133
5.4	Morcone	135
5.5	Casalpiano – La badia di S. Maria	138
5.6	Frosolone – Fortificazione sannitica	141
Appendice 1		152
Conclusioni		162
Bibliografia		163

Introduzione

L'interesse per la Geofisica Applicata è nato a cavallo della prima guerra mondiale e le prime applicazioni si hanno nel 1930/1940. All'inizio le tecniche metodologiche di ricerca erano legate a questioni belliche: metal detector, sistemi di rilevazione elettromagnetici e il radar. In seguito, grazie ai successi ottenuti dalle metodologie, si effettuarono delle applicazioni anche in campo archeologico. Da quel momento si instaura una collaborazione interdisciplinare tra geologi e archeologi che porta a un nuovo modo di fare ricerca tramite l'applicazione di diverse tecniche geofisiche; scopo principale è individuare ciò che si nasconde nel sottosuolo, comprendere meglio un sito già noto e indirizzare le operazioni di scavo. Il geofisico dunque può fornire delle possibili risposte agli interrogativi posti dall'archeologo, in riferimento soprattutto all'estensione, allo spessore o all'articolazione del deposito antropico.

Grazie alla disponibilità di macchine sempre più leggere e portatili e all'approfondimento delle conoscenze inerenti ai codici e ai modelli di calcolo, nonché alla sperimentazione specifica nel campo dei Beni Culturali, queste metodologie sembrano essere sempre più indispensabili per la ricerca soprattutto per la loro proprietà principale: non sono dei metodi invasivi.

L'integrazione delle ricostruzioni tridimensionali del volume del sottosuolo con i modelli 3D delle strutture in superficie, effettuati con le più moderne tecniche di rilievo e documentazione tridimensionale, rappresentano un potente e risolutivo strumento per contribuire alla conoscenza, valorizzazione, conservazione e tutela del bene in esame.

La ricerca da me condotta durante i tre anni di dottorato, è stata svolta proprio nell'ambito delle possibili applicazioni di queste innovative metodologie introdotte nel campo archeologico.

L'oggetto della tesi è stato lo studio del Parco Archeologico di Egnazia (BR), uno dei più interessanti siti della Puglia. Il lavoro rientra all'interno di un Progetto Furb coordinato dalla Prof.ssa Marilena Cozzolino in collaborazione con l'Università Aldo Moro di Bari, il Dipartimento di Scienze Sociali, il Politecnico di Bari e Dipartimento di Scienze dell'Architettura; dunque fin dall'inizio ho lavorato in stretta collaborazione con gli altri attori del progetto confrontando idee e risultati, in modo da pianificare le strategie di intervento. Le operazioni di ricerca sono state condotte in due fasi di lavoro:

una direttamente sul campo con l'acquisizione dei dati, l'altra di elaborazione delle informazioni registrate tramite l'impiego di opportuni software. Come si evince dal titolo della tesi le metodologie adottate sono la tomografia elettrica per la parte inerente allo studio geofisico, il laser scanner e la fotogrammetria per il rilievo tridimensionale.

Inoltre, grazie alla collaborazione con la Prof.ssa Cozzolino ho potuto testare le medesime metodologie impiegate ad Egnazia in altri contesti presenti sul territorio, in modo da approfondire la conoscenza dell'utilizzo delle diverse tecniche geofisiche e le relative rielaborazioni dei dati acquisiti, al fine di constatare e comprendere il principio di funzionamento, il tipo di strumentazione implicata nella misura, il tipo di risposta che fornisce, le profondità di investigazione raggiungibili e il campo di applicabilità. Diversi sono stati i casi studio di carattere archeologico indagati, ma solo alcuni sono riportati in questa sede. Considerando che ancora non esiste un metodo d'indagine geofisica esclusivamente pensato per una ricerca archeologica piuttosto che una geologica, è stato necessario scegliere di volta in volta il metodo di ricerca più adatto a quel determinato contesto, in base alle caratteristiche dell'area: la costituzione geolitologica dei terreni, la morfologia e l'uso del suolo, le condizioni logistiche e gli eventuali disturbi causati dalle infrastrutture dei centri abitati e industriali; al fine di ottenere dei risultati quanto più validi possibili, sono state confrontate le diverse modalità con le quali ottenere le varie sequenze di acquisizioni e talvolta sono state integrate e/o confrontate le diverse tecniche d'indagine geofisica.

In quest'ottica il progetto di dottorato vuole essere un contributo per sottolineare l'importanza della geofisica e del rilievo tridimensionale applicata ai Beni Culturali e del loro potere risolutivo in campo archeologico. L'obiettivo di partenza (che è stato poi raggiunto) prevedeva di fornire gli elementi e gli strumenti necessari per integrare le conoscenze del Parco Archeologico di Egnazia (BR), uno dei più interessanti siti archeologici della Puglia, e di contribuire a migliorare la fruizione e la valorizzazione del Parco che già dispone di spazi museali, ma anche di agevolare le indagini archeologiche presenti e future, nonché contribuire con nuovi elementi, quali i prodotti del rilievo 3D, ad una più facile interpretazione delle dinamiche formative e di trasformazione subite dalla città, dare in tempi brevi un ulteriore strumento per la divulgazione del sito che, se ripetuto saltuariamente, consente anche un monitoraggio

nel tempo del complesso, poiché permette di misurare il degrado materico con oneri economici e di tempo piuttosto contenuti

Il primo capitolo tratta in linea generale il ruolo delle nuove tecnologie nell'ambito di progetti di studio e tutela.

Nel secondo capitolo si espongono le varie metodologie geofisiche, sia attive che passive, e per ognuna di esse si illustra il principio di funzionamento, la strumentazione impiegata, il tipo di misura adottato e la risposta che fornisce, i vantaggi e i limiti. In particolare, dopo aver esposto i criteri della scelta metodologica, viene approfondita la descrizione del metodo impiegato nella mia ricerca, ovvero il geoelettrico. Infine, viene affrontato il problema dell'inversione dei dati e si analizzano i processi di elaborazione che portano ad una efficace ed esaustiva interpretazione del dato geofisico.

Il terzo si riferisce all'applicazione del laser scanner e della fotografia digitale in ambito archeologico. Dopo aver introdotto la questione, si riporta, per ogni tecnica adoperata, la descrizione della strumentazione, i principi e le modalità di operazione sul campo, nonché i vari processi per il trattamento dei dati.

Il quarto capitolo analizza in dettaglio i risultati di questi tre anni di ricerca condotta nel parco archeologico di Egnazia: dopo un inquadramento storico-archeologico dell'antica città, si illustrano i risultati ottenuti dalle prospezioni geoelettriche effettuate in aree interne ed esterne al parco, e gli elaborati estratti dai modelli tridimensionali generati dalle scansioni e dalle fotografie digitali acquisite nell'area prescelta identificata con la zona delle terme del foro.

Infine, nell'ultimo capitolo, sono riportati diversi casi studio, tutti esempi che rispecchiano il nodo focale di questa ricerca: l'applicazione del metodo geoelettrico per la tutela del patrimonio culturale.

Capitolo 1 – Il ruolo delle nuove tecnologie nell’ambito di progetti di studio e tutela dei beni culturali

Il totale disinteresse per i numerosi sventramenti di aree archeologiche in favore delle grandi opere infrastrutturali per la fase di ricostruzione postbellica, ha escluso sin da allora la partecipazione di archeologi nei progetti di lavoro e negli interventi sul campo. Solo agli inizi degli anni '80 si ha una prima conquista in termini di intervento a tutela del patrimonio archeologico: vengono emesse due circolari¹ con le quali si impone alle Amministrazioni pubbliche di sottoporre all’esame del Ministero dei Beni Culturali tutti i progetti da realizzare in aree anche solo indirettamente vincolate, in modo da verificare la compatibilità dei progetti con le preesistenze archeologiche².

Gli archeologi impegnati sul campo, però, si trovano a dover stabilire un accordo tra due esigenze principali: da un lato c’è il problema della salvaguardia del patrimonio e del bene culturale, dall’altro il dover rispondere in breve tempo alla richiesta delle attività di scavo di Soprintendenze o enti privati.

Da qui il continuo susseguirsi di decreti legge e modifiche ai relativi articoli; si inizia finalmente a parlare di indagini archeologiche preventive (all’interno di queste trovano spazio anche le nuove tecnologie), le quali sono predisposte all’interno del Codice per i beni culturali e del paesaggio³, che stabiliscono: *in caso di realizzazione di opere pubbliche ricadenti in aree di interesse archeologico, anche quando per esse non siano intervenute la verifica di cui all'art. 12, co. 2, o la dichiarazione di cui all'art. 13, il soprintendente può richiedere l'esecuzione di saggi archeologici preventivi sulle aree medesime a spese del committente dell'opera pubblica*. In particolare nel successivo art. 96 comma 1 si prevedono due fasi inerenti alla procedura di verifica preventiva dell’interesse archeologico, una delle quali si riferisce specificamente ad attività di carotaggi, prospezioni geofisiche e geochimiche, saggi archeologici a campione. Ulteriori regolamentazioni si hanno con la legge 109/2005⁴ e con il successivo regolamento attuativo della stessa⁵.

¹ 20 aprile 1982 e 24 giugno 1982.

² DE CARO 2008.

³ A partire dal decreto legislativo del 22 gennaio 2004 n. 42 e articolo 28 comma 4.

⁴ Il Decreto legislativo. n. 63/2005 è stato convertito nella legge n. 109/2005.

⁵ Decreto Ministeriale 60/2009.

Anche prima della loro predisposizione all'interno del Codice, le metodologie di prospezione geofisica hanno e continuano ad avere un grande successo in archeologia; oltre ad essere uno strumento importante in fase di prevenzione, oggi sono intese pure come servizi per migliorare la valorizzazione e la conservazione del patrimonio culturale. Infatti trovano posto nei decreti legislativi, come nell'Art. 6 del Codice dei Beni Culturali e Paesaggistici⁶ dove è scritto che per la conservazione del patrimonio culturale è fondamentale ogni azione di valorizzazione che favorisca la conoscenza. Inoltre la diagnosi ottenuta da queste indagini integra ciò che fino ad ora si è utilizzato per la conoscenza e la tutela del patrimonio culturale, ovvero la carta archeologica e la carta del rischio archeologico, dal momento che si vanno a segnalare siti archeologicamente sommersi.

Il successo delle prospezioni geofisiche in campo archeologico, architettonico ed artistico, è dovuto al fatto che si tratta di tecniche non invasive, che non vanno ad alterare la natura del deposito antropico sepolto, capaci di adeguarsi ed indagare in ogni tipo di ambiente di ricerca e restituiscono risultati molto dettagliati, attendibili e precisi in breve tempo, con un significativo risparmio di energie ed economico.

Dal momento che il loro impiego presuppone un lavoro multidisciplinare, un convergere e un'integrazione di conoscenze umanistiche e scientifiche, vi è un continuo aggiornamento e sviluppo sia nelle strumentazioni (sempre più leggere, precise e facilmente trasportabili) sia nei modelli di calcolo dei dati raccolti sul campo (più veloci e capaci di rappresentare i dati geofisici con elaborazioni bidimensionali e tridimensionali facilmente interpretabili). Esse, dunque, sono capaci di fornire informazioni sul degrado e sullo stato di conservazione, individuare le aree d'interesse archeologico ancora sconosciute o presunte rendendo il "sommerso visibile", comprendere meglio un sito già noto, possono fornire informazioni utili per pianificare progetti di restauro, di interventi di scavo e di studio del paesaggio su scala territoriale, creare modelli 2D e 3D del sottosuolo.

L'archeologia preventiva è diventata un vero e proprio settore dell'archeologia, tanto che in Francia nel 2002 è stato creato l'INRAP (Institut national de recherches archéologiques préventives), un istituto pubblico di ricerca tutelato sia dal Ministero della Cultura e della Comunicazione che dal Ministero della Ricerca: lo scopo è di

⁶ Decreto legislativo del 22 gennaio 2004.

assicurare la localizzazione e lo studio del patrimonio archeologico interessato dai lavori di pianificazione territoriale, e di operare per la diffusione e la valorizzazione dell'archeologia. L'INRAP coordina anche un altro progetto chiamato ACE (Archaeology in contemporary europe: professional practices and public outreach), che con il sostegno del Programma Cultura 2007-2013 della Commissione Europea, si confronta su quattro tematiche principali: la ricerca del significato del passato, le pratiche comparative nell'archeologia, la professione dell'archeologo e il contatto con il pubblico⁷. Nel Regno Unito, mentre, l'introduzione di una normativa sull'Interesse Archeologico Preventivo ha prodotto un importante incremento dei dati archeologici, una documentazione raccolta nel corso delle esplorazioni ed inserita nei sistemi di informazione Spectrum e MIDAS⁸.

Nel nostro paese, purtroppo, l'archeologia preventiva non si è ancora configurata come una vera e propria disciplina, così come l'archeologo non ha ancora una propria autonomia professionale poiché dipende ed opera ancora per conto delle Università o della Soprintendenza. Per questo motivo si continua a sottolineare l'importanza del concetto di integrazione tra le diverse figure di professionisti, quali l'archeologo, il topografo, il geologo, il geofisico, ecc.. Proprio grazie ad un lavoro di completa collaborazione e sinergia con il geofisico, l'archeologo può far affidamento su un importante strumento di prevenzione e di individuazione del target archeologico, ovvero le prospezioni geofisiche.

Per un settore così giovane e in costante sviluppo, le pubblicazioni⁹, le conferenze¹⁰ e i convegni sono i modi migliori per seguire l'evoluzione di questa disciplina e delle relative problematiche connesse alle applicazioni archeologiche; essa accanto al telerilevamento, ai carotaggi, alla topografia antica e all'analisi del paesaggio, alle ricognizioni di superficie, alle analisi sedimentologiche, geochimiche e paleobotaniche,

⁷ Treccani: archeologia-preventiva (Lessico-del-XXI-Secolo). Si veda anche www.inrap.fr

⁸ D'ANDREA 2008.

⁹ Tra le prime si ricordano periodici come la «Revue d'Archéométrie» (fondata in Francia nel 1977), «Archaeological Prospection» (edita da Wiley dopo il 1944 in Inghilterra), le riviste internazionali come «Geophysics» (della società americana SEG-Society for Exploration Geophysics), «Near Surface Geophysics» (della società europea EAGE, «Archaeometry», e le riviste che riportano articoli di geofisica come «Antiquity» (a cura di Martin Carver).

¹⁰ Dal 1958 vengono organizzate periodicamente conferenze internazionali come l'International Conference on Archaeological Prospection, o congressi organizzati da enti come la British Geological Survey e l'Università di Bradford in Inghilterra, la GMPCA (Groupement des Méthodes Pluridisciplinaires Contribuant à l'Archéologie) in Francia, o il CNR (Centro Nazionale per la Ricerca) in Italia.

rientra in quella che viene definita “diagnostica archeologica”: secondo la definizione di Franco Cambi, la diagnostica comprende tutte le procedure necessarie per effettuare un’indagine non distruttiva, o minimamente distruttiva, di un sito archeologico¹¹.

Dunque, le prospezioni geofisiche si collocano, sempre più spesso, nell’ambito di progetti di studio e tutela dei beni culturali, proprio perché cresce la necessità di conciliare la richiesta di tutela con quelle operative: nei progetti di studio si pongono come fase intermedia fra la ricognizione archeologica e le attività di scavo, distinguendosi dalla ricognizione per le maggiori capacità di predizione, e dallo scavo per l’inesistenza dell’impatto distruttivo; nei progetti di tutela questi metodi vengono adoperati in modo crescente per la conoscenza e salvaguardia dei beni culturale, ma soprattutto per la programmazione territoriale e nello studio di problemi inerenti il patrimonio culturale. Infatti, l’esigenza da parte di enti privati o pubblici, quali soprattutto le soprintendenze, di conoscere in modo preventivo il territorio in questione è di primaria importanza: l’esito di questo esame preliminare influenza il futuro dei lavori infrastrutturali, dalle attività edilizie alle estrattive fino alle grandi opere infrastrutturali, dal momento che i risultati suggeriscono la presenza o l’assenza di elementi antropici e dunque gettano le basi per l’apposizione o meno del vincolo archeologico, e quindi permettono di esprimere il proprio parere in maniera motivata sulla base della conoscenza approfondita del contesto indagato.

¹¹ BOSCHI 2009.

Capitolo 2 – Metodologie di prospezione geofisica applicate ai siti archeologici

Con il termine Geofisica indichiamo la scienza che studia la parte più superficiale della Terra dal punto di vista delle proprietà fisiche. Inizialmente essa era principalmente impiegata nel campo di ingegneria civile, ingegneria idraulica, ingegneria mineraria, geologia e per l'individuazione di fonti di energia geotermica. Nel XIX secolo si assiste ad un suo concreto sviluppo, con un ulteriore potenziamento negli ultimi cinquanta anni. Negli ultimi decenni il loro uso in campo archeologico è sempre più massiccio e fondamentale, a dimostrazione dell'importante contributo delle metodologie geofisiche nell'indagare gli strati più superficiali del terreno.

Le prime applicazioni risalgono agli anni '30 e '40 e si basavano sulle caratteristiche elettriche del terreno: nel 1946 Richard Atkinson indagò il sito neolitico di Dorchester¹², mentre John Martin e Anthony Clark la città romana di Cunetio (Wiltshire)¹³. L'utilizzo di tali prospezioni divenne sempre più diffuso ed importante, tanto da portare alla creazione, nel 1954, di un punto di riferimento europeo per le indagini geofisiche applicate all'archeologia, la Sezione Prospezioni Archeologiche della Fondazione LERICI del Politecnico di Milano supervisionata da Richard Linington. La stessa fondazione nel 1966 inaugurò la rivista «Prospezioni Archeologiche»¹⁴. Ovviamente i grandi successi ottenuti sul campo sono strettamente legati all'elaborazione dei dati acquisiti, nonché alle innovazioni dei sistemi di filtraggio dei dati grezzi come quello del 1958 di Irwin Scollar¹⁵.

Oltre alla geoelettrica, a partire dalla metà degli anni '90, iniziarono ad essere introdotti ed utilizzati anche altri metodi: Martin Aitken e Edward Hall, ideatori di un prototipo di magnetometro a protoni¹⁶, effettuano alcuni test nella città romana di Durobrivae (Northamptonshire); Ralph (Università di Pennsylvania) sperimenta presso l'antica città di Sibari il primo magnetometro in configurazione radiometrica; John Alldred progetta il gradiometro fluxgate¹⁷.

¹² LERICI 1969.

¹³ CLARK 1996.

¹⁴ LERICI 1969.

¹⁵ BOSCHI 2009.

¹⁶ LERICI 1969.

¹⁷ CLARK 1996.

Nel 1967 John Musty istituì la Geophysics Section of the Ancient Monuments Laboratory, concentrandosi sullo studio del sistema innovativo con multisonda per le indagini geoelettriche e per la produzione di attrezzature più maneggevoli che richiedevano l'impiego di un solo operatore¹⁸.

Dopo queste prime esperienze europee, che portarono all'individuazione di un buon numero di siti sconosciuti, si assiste ad un rapido sviluppo e diffusione dell'uso delle strumentazioni e dei programmi di elaborazione. Un successo dovuto al fatto che tali metodologie permettono una ricognizione del sottosuolo mediante la misura di alcune grandezze fisiche. In sostanza, dalla superficie del terreno è possibile registrare la variazione (*anomalie*) di alcune proprietà fisiche (resistenza e conducibilità elettrica, suscettività magnetica, microvariazioni della gravità e variazione termica) che, se correttamente interpretate, permettono di avere informazioni sui corpi sepolti (come le dimensioni e la profondità)¹⁹.

Dal momento che non esiste un'esclusiva metodologia da utilizzare in campo archeologico, è necessario capire e scegliere, a seconda delle caratteristiche del sito da indagare, il metodo più idoneo da applicare a quel contesto. La scelta è influenzata anche dalla costituzione geolitologica dei terreni, la morfologia e l'uso del suolo, le condizioni logistiche dell'area oggetto dell'intervento di prospezioni e gli eventuali disturbi causati dalle infrastrutture dei centri abitati e industriali. In quest'ambito si distinguono due gruppi di metodologie: metodi attivi e passivi.

Tra i metodi passivi rientrano il magnetico, il gravimetrico, il termografico e dei potenziali spontanei; essi si definiscono passivi proprio perché captano segnali originati da sorgenti naturali e che già sono presenti nel sottosuolo. I metodi attivi, mentre, inviano un segnale nel sottosuolo e valutano le modifiche che esso subisce durante il percorso; tra questi vi sono il georadar, l'elettromagnetismo, la sismica, la polarizzazione indotta e la geoelettrica.

2.1 METODI PASSIVI

2.1.1 IL METODO MAGNETICO

Il metodo magnetico fu utilizzato in origine per scopi bellici, per l'individuazione di giacimenti minerari o depositi geologici. Esso si basa sulla misura di alcune variazioni

¹⁸ BOSCHI 2009.

¹⁹ BOSCHI 2009.

(anomalie) che si manifestano nel terreno rispetto al Campo Magnetico Terrestre (CMT). Le anomalie delle strutture archeologiche vengono individuate poiché esse contengono ossidi di ferro²⁰ diverse rispetto a quelle presenti nel terreno circostante; in base a ciò viene misurata la differenza esistente tra la suscettività magnetica rimanente (cioè quella dei corpi sepolti) e la suscettività media del terreno²¹.

Ricordiamo che gli elementi di origine antropica come i materiali in cotto, i metalli, i focolari o le fornaci sono soggetti ad uno stress termico e dunque ad una accentuazione delle particelle magnetiche. Ciò è legato ai passaggi di ricottura a cui sono sottoposti: i dipoli magnetici dei singoli cristalli se posti a calore cambiano l'orientamento; da una disposizione casuale si dispongono in direzione del campo magnetico presente in quel momento, posizione che viene fissata con il raffreddamento²². In altre parole, i materiali perdono le caratteristiche magnetiche al di sopra di una certa temperatura (Curie) per poi riacquistarle in modo permanente in fase di raffreddamento; ciò avviene in modo differente per ogni tipo di materiale²³.

Diversa è la strumentazione impiegata: oltre al magnetometro a protoni, vi sono Overhauser, Fluxgate, Magnetometro a pompaggio ottico o a rubidio e il Magnetometro SQUID o a effetto Josephson.

Escludendo a priori la loro applicabilità all'interno di aree urbane, data la presenza di linee di alta tensione elettrica e di materiali metallici, sono ideali per ambienti extraurbani: le formazioni che rivelano interessante per questo tipo di prospezione, si dividono in concentrate (con dimensioni più o meno uguali in tutte le direzioni come pozzi, forni, tombe, ecc.) e lineari (che si estendono in una direzione come fossati o strade)²⁴.

E' chiaro dunque che l'uno di questa metodologia è indicato per terreni uniformi, composti da materiali piuttosto fini e con una media suscettività magnetica; mentre, terreni sabbiosi, irregolari e con presenza di blocchi di origine vulcanica si presentano come ambienti meno idonei. Per quanto riguarda l'acquisizione dei dati, si hanno due procedure differenti che permettono di ricavare delle mappe magnetiche all'interno delle quali le anomalie sono differenziate tramite una scala cromatica: in modalità

²⁰ LERICI 1969.

²¹ WEYMOUTH 1986; FERRARA 2012.

²² BOSCHI 2009; LERICI 1969.

²³ SCOLLAR 1990

²⁴ PIRO 2003.

puntuale, su ogni nodo di una griglia regolare prestabilita, o in modalità continua, con andatura costante lungo profili paralleli²⁵.

2.1.2 IL METODO GRAVIMETRICO

Questo tipo di prospezione si basa sull'individuazione di anomalie (anomalie di Bouguer) generate dal campo gravitazionale dovute alla disomogeneità della distribuzione di materiali nel sottosuolo. Ogni corpo presenta una sua densità che si differisce rispetto a quella del volume in cui è contenuto; in base a questa densità si avranno anomalie negative o positive che vengono rilevate dal microgravimetro: esso consiste in una molla collegata ad una massa che misura l'attrazione gravitazionale presente in un determinato punto, al fine di produrre una mappa delle anomalie di gravità. Proprio per queste caratteristiche è particolarmente indicato per l'individuazione di grosse strutture antropiche, riempimenti, ambienti ipogei, vuoti di tombe e cunicoli²⁶.

2.1.3 IL METODO DEI POTENZIALI SPONTANEI (SP)

Questo metodo consiste nel misurare tramite un millivoltmetro la differenza di potenziale che si genera spontaneamente tra due elettrodi immessi nel terreno in presenza di un campo naturale che si verifica soprattutto a causa di fenomeni idraulici, ma anche chimici o termici. Nelle procedure di acquisizione gli elettrodi possono essere spostati contemporaneamente mantenendone fissa la distanza, oppure un elettrodo viene mantenuto fisso mentre l'altro si muove lungo la linea da sondare. Il risultato è una carta topografica dove i punti con uguale potenziale vanno a formare delle linee equipotenziali in modo da evidenziare le aree anomale (zone dove i potenziali si discostano dai valori medi)²⁷.

²⁵ PIRO 2003.

²⁶ TORO – DI FILIPPO 1999; *Cfr.* LININGTON 1966; KOLENDO *et alii* 1973; FAJKLEWICZ *et alii* 1982; PARASNIS 1997, TELFORD *et alii* 1976.

²⁷ RIZZO – GIAMPAOLO 2013.

2.2 METODI ATTIVI

2.2.1 GROUND PENETRATING RADAR

Le prime applicazioni si hanno in ambito spaziale per studiare le variazioni del suolo lunare²⁸; successivamente venne utilizzato per la localizzazione di cavità, tubi, tunnel, contatti litologici e solo nel 1975 venne testato per la prima volta in campo archeologico con lo scopo di individuare strutture murarie situate a profondità superiori a 1m. A questi studi condotti nella città di Chaco Canyon (Nuovo Messico), si susseguirono le ricerche nel 1979 di Peter Fisher a Cipro (nel sito di Hala Sultan Tekke), di Payson Sheets in El Salvador (nel sito di Ceren) e di Trudy Vaughan nel 1982-83 in Canada (a Red Bay Labrador). L'esplorazione che ebbe più successo fu quella del 1993 condotta in Giappone da Dean Goodman, che ebbe l'intento di mappare le case e i tumuli di sepoltura²⁹. Ovviamente il successo delle applicazioni GPR è legato al progressivo sviluppo delle tecniche di acquisizione ed elaborazione dei dati. A tal proposito si ricordano i contributi di Lawrence B. Conyers, Jeffrey Lucius e Dean Goodman, grazie ai quali oggi possiamo parlare di *time-slice* e di ricostruzioni tridimensionali della realtà sepolta³⁰.

Questo strumento si basa sulla emissione e propagazione di impulsi elettromagnetici nel terreno e sui fenomeni di riflessione e rifrazione che essi subiscono durante la propagazione quando incontrano elementi di discontinuità geoelettrica e geometrica nel sottosuolo³¹.

I dati che vengono misurati sono due: il tempo che impiega l'onda per compiere il suo percorso (dall'antenna trasmittente, alla superficie di discontinuità e a tornare in dietro fino all'antenna ricevente), e l'ampiezza dell'onda riflessa. Da qui si ha:

$$t = \frac{2h}{v} \quad (1)$$

dove t è il tempo doppio di viaggio (o *two way time*), h la profondità a cui si trovano i riflettori ($2h$ perché il tragitto viene percorso due volte dall'onda), v la velocità di propagazione all'interno dei materiali; da qui si ricava:

$$h = \frac{vt}{2} \quad (2)$$

²⁸ Nel 1929 venne usata per determinare lo spessore di un ghiacciaio; non fu più impiegata fino agli anni Settanta con la missione lunare Apollo 17.

²⁹ CONYERS - GOODMAN 1997.

³⁰ BOSCHI 2009.

³¹ CONYERS - GOODMAN 1997.

Principio base, dunque, è quello delle onde elettromagnetiche: quando due o più onde si sovrappongono creano un fenomeno ondulatorio, dove il campo elettrico e quello magnetico sono associati tra loro per formare un campo elettromagnetico; la propagazione delle onde in un corpo dipende dalla permeabilità magnetica e dalla costante dielettrica. Più è alta la resistività, minore è il limite di frequenza oltre il quale avviene la propagazione delle onde. La grandezza fisica che viene misurata è la permittività dielettrica, la capacità di un corpo di immagazzinare e restituire l'energia elettromagnetica³². Essa dipende dalla composizione chimica, la densità, la porosità e il contenuto d'acqua nei materiali: i cattivi conduttori (materiali ad alta resistività) consentono alle onde una elevata penetrazione poiché hanno bassa permittività elettrica; viceversa succede per i materiali che contengono molta acqua, presentandosi come buoni conduttori.

In sostanza, si ha un'unità centrale che emette gli impulsi (con frequenze comprese nell'intervallo 10 – 2000 MHz) e controlla in tempo reale l'acquisizione e da un'antenna che riceve l'eco: quando le onde emesse raggiungono una discontinuità, parte di esse attraversano il materiale intercettato e parte vengono riflesse in direzione della superficie e captate dall'antenna ricevente (se si utilizzano due antenne si parla di modalità bistatica).

I dati ricevuti dall'antenna vengono registrati dall'unità centrale, trasformati in formato digitale e rappresentati con grafici definiti radargrammi: in ascissa la distanza percorsa dall'antenna sulla superficie, in ordinata i tempi prescelti per la prospezione. Per ridurre i possibili disturbi, i profili vengono elaborati al fine di posizionare le tracce radar registrate ai nodi di una griglia regolare. Dopo successive operazioni di interpolazione, operate utilizzando tutti i profili e le tracce registrate, viene generata una matrice tridimensionale che rappresenta il volume di dati nella finestra temporale adottata a determinate profondità, dal quale si estrapolano sezioni verticali e planimetrie³³.

Importante è sottolineare che la qualità della risoluzione dipende dalla lunghezza d'onda delle onde che si propagano nel terreno; la lunghezza d'onda (λ), dipende dalla frequenza f e dalla velocità di propagazione v :

$$\lambda = v/f \quad (3)$$

³² PIRO 2003.

³³ PIRO 2003.

Dunque più piccoli sono gli oggetti che si vogliono rilevare, più piccola è la lunghezza d'onda e più è elevata la frequenza³⁴.

2.2.2 IL METODO ELETTROMAGNETICO

Il principio base è l'energia elettromagnetica che consiste nell'unione di un campo elettrico con un campo magnetico. Le anomalie che si rilevano con il metodo elettromagnetico sono legate ai cambiamenti di conduttività del terreno: tramite una sorgente di corrente elettrica si genera un campo primario che propagandosi sopra, sotto e all'interno del terreno, polarizza i materiali situati nel raggio d'azione creando un secondo campo di tipo magnetico; un sensore misurerà le diverse conduttività che si verificano nel sottosuolo³⁵. Dunque le formazioni sepolte verranno individuate in base alle loro caratteristiche inerenti alla conduttività elettrica e suscettività magnetica; particolarmente favorevoli risulteranno i contesti con metalli, strutture in laterizi, strutture impregnate di acque ad alto contenuto salino, ecc. Gli elettromagnetometri (EM) più usati sono alimentati a batterie, hanno un pannello di controllo che permette di visualizzare in tempo reale i parametri, sono dotati di memorie elettroniche e presentano i sensori trasmettenti e ricevitori posizionati all'estremità dello strumento in modo da mantenere distanze fisse. Le misure acquisite sul campo verranno rappresentate in grafici in cui la presenza dei corpi sepolti è suggerita dalla morfologia delle curve di isovalore e dalle scale cromatiche³⁶.

Il limite è rappresentato, in fase di restituzione, da immagini con contorni poco netti; da tener presente che per rilevare un oggetto profondo occorre una frequenza bassa, ma la risoluzione sarà minore.

2.2.3 IL METODO SISMICO

Questo metodo non è molto risolutivo in campo archeologico poiché i tempi di interferenza tra il segnale provocato con la struttura antropica è molto piccola e quindi di difficile lettura (si parla di centesimi e millesimi di millisecondo). Esso si basa sulla misura delle proprietà elastiche del mezzo, cioè misura la propagazione nel sottosuolo di onde sismiche artificiali generate da una sorgente: la perturbazione si propaga nel

³⁴ CONYERS - GOODMAN 1997.

³⁵ CONYERS - GOODMAN 1997.

³⁶ BOSCHI 2009.

terreno con una velocità proporzionale alle caratteristiche elastiche del terreno attraversato. La sorgente sismica deve essere sufficientemente potente da far penetrare l'impulso nel sottosuolo ma, allo stesso tempo, deve essere in grado di consentire una buona risoluzione.

2.2.4 METODO DELLA POLARIZZAZIONE INDOTTA

Studiato ed analizzato per la prima volta da Conrad Schlumberger nel 1912, in archeologia ha avuto moderati successi soprattutto per la definizione geometrica di corpi metallici di origine antropica o per valutare meglio le modifiche delle proprietà fisiche dei corpi sepolti in seguito all'interazione con l'acqua.

Dalla misura contemporanea delle variazioni di caricabilità e di resistività nella stessa zona di investigazione, si ottiene una ricostruzione dettagliata del sottosuolo. Le misure sono fatte utilizzando due elettrodi di corrente e due di potenziale non polarizzabili. Quando si sospende l'immissione della corrente elettrica nel terreno, il voltaggio tra gli elettrodi di potenziale non è direttamente 0 ma segue una curva di decadenza, in quanto il terreno è temporaneamente caricato (polarizzato); anche quando viene immessa corrente nel terreno, il voltaggio tra gli elettrodi raggiunge il massimo valore non in modo istantaneo ma dopo un certo intervallo di tempo (*rise-time*). Da questi tempi (di decadimento e il *rise-time*), che dipendono da fattori geologici, si possono intercettare le strutture presenti nel terreno.

Le misure di polarizzazione indotta possono essere effettuate nel dominio del tempo o nel dominio delle frequenze. Quando si applica una corrente nel terreno, nel momento in cui si interrompe tale flusso è possibile valutare, quando sono presenti dei fenomeni di polarizzazione, un potenziale totale determinato dalla somma del potenziale applicato ed il potenziale di polarizzazione. Nelle misure eseguite nel dominio del tempo, il rapporto tra questi due potenziali definisce il parametro caricabilità o polarizzabilità del terreno. Per le misure nel dominio delle frequenze la polarizzazione indotta è analizzata misurando la resistività apparente del terreno immettendo nel terreno corrente alternata in luogo della corrente continua. In questo caso piuttosto che descrivere il parametro resistività del terreno si definisce l'impedenza del terreno stesso. All'aumentare del tempo di immissione della corrente e al diminuire della frequenza di misure, il

potenziale di polarizzazione aumenta. Di conseguenza la resistività apparente a basse frequenze è maggiore di quella ad alta frequenza³⁷.

I valori misurati, rappresentati su carte topografiche, consentono di valutare l'estensione, la posizione e l'ampiezza del corpo che ha generato la polarizzazione indotta.

2.2.5 METODO GEOELETTRICO

Il metodo geoelettrico è stato utilizzato in campo archeologico a partire dagli anni '60 dello scorso secolo³⁸; oggi risulta il sistema più utilizzato nella ricerca archeologica assieme al georadar e la magnetometria. Principio base è la resistività elettrica, cioè la resistenza che ogni corpo oppone al passaggio della corrente elettrica: la presenza di umidità nei primi metri del sottosuolo fa sì che i terreni interessati si presentino come dei buoni conduttori di elettricità, al contrario di strutture compatte in pietra (resti di fondazioni di edifici, mura, strade o vuoti riferibili a tombe) si presentano come dei cattivi conduttori di elettricità o isolanti. Lo strumento, solitamente composto da una coppia di elettrodi energizzanti e una coppia potenziometrici piantati a profondità minima, misura le variazioni del campo elettrico indotto artificialmente dal terreno, e nello specifico si analizzano le variazioni prodotte da corpi presenti nel sottosuolo caratterizzati da una diversa resistività elettrica: pertanto, le geometrie sepolte possono essere individuate semplicemente in funzione del parametro fisico che indica tale comportamento. Il risultato, è una serie di sezioni verticali e orizzontali (tomografie). Tale metodologia verrà analizzata nel dettaglio nel paragrafo successivo (2.4) dove vengono specificati il principio di funzionamento, la grandezza fisica adottata e misurata, i vantaggi e i limiti; questa scelta è dettata dal fatto che il sistema è stato adottato per condurre le prospezioni inerenti al mio progetto.

2.3 PRINCIPI PER UNA SCELTA METODOLOGICA

Come abbiamo visto, tutte le tecniche di indagine geofisica si basano su diverse proprietà fisiche sia dei materiali, quali quelle elettriche, magnetiche e meccaniche, sia delle eventuali strutture o manufatti presenti. Lo scopo comune è quello di individuare

³⁷ CAMMARANO *et alii*, 1997.

³⁸ CAMMARANO *et alii*, 1997; CARABELLI 1967; AITKEN 1974; PATELLA 1978; BERNABINI *et alii* 1985; CLARK 1986; ORLANDO *et alii* 1987; LA PENNA *et alii* 1992.

un oggetto che presenti una variazione più o meno netta rispetto al mezzo di contorno. Per avere delle informazioni il più oggettive possibili l'ideale sarebbe integrare diverse metodologie, un approccio che aumenta senza dubbio la probabilità di successo dell'investigazione geofisica ma purtroppo non sempre le condizioni ambientali lo permettono: integrare e valutare simultaneamente più dati ottenuti dall'interpretazione di più parametri fisici che descrivono la stessa situazione, e che riscontrano le stesse anomalie, permette un'analisi più accurata, completa e precisa dei modelli elaborati.

La scelta di una metodologia piuttosto che un'altra, può compromettere la riuscita della ricerca. Avere chiaro l'obiettivo e sapere cosa si sta cercando non basta per ottenere buoni risultati; considerando che ogni situazione archeologica presenta caratteristiche particolari circa la natura e la tipologia dell'insediamento e delle strutture sepolte, bisogna conoscere a priori in modo approfondito l'area dove si va ad indagare al fine di scegliere la strumentazione più idonea per quel contesto: da tener presente, infatti, sono la costituzione geolitologica dei terreni nei quali è sepolto il presunto elemento archeologico, le condizioni logistiche dell'area, fattori puramente geofisici (come i disturbi causati dalle infrastrutture dei centri abitati e industriali, nonché dalle linee elettriche e ferroviarie) ed economici.

In fase preliminare, fondamentale è anche la pianificazione delle misure sia da un punto di vista tecnico/scientifico che logistico, uno studio accurato ed attento delle mappe telerilevate ma anche bibliografico e di archivio del territorio.

In base a quanto detto, è stato scelto di utilizzare il metodo geoelettrico per la presente ricerca, un metodo che pur avendo tempi di acquisizione meno rapidi rispetto agli altri risulta più efficace perché fornisce risultati facilmente interpretabili, è molto versatile alle variazioni delle condizioni del terreno ed è ideale persino per l'individuazione di strutture anche molto profonde.

2.4 IL METODO GEOELETRICO

Fino a pochi anni fa il metodo geoelettrico è stato quasi del tutto ignorato per le prospezioni di carattere archeologico, poiché risulta essere molto meno rapido in fase di acquisizione rispetto ad altri, come ad esempio al più noto metodo georadar. Eppure questo tipo di prospezione ha la capacità di investigare profondità praticamente "infinite", in relazione ai problemi di natura archeologica; questa caratteristica lo

rendono particolarmente efficiente sia in fase di acquisizione che di risposta finale del dato³⁹.

2.4.1 IL PRINCIPIO FISICO DELLA RESISTIVITÀ ELETTRICA

La resistività ρ è una grandezza fisica intrinseca delle rocce che viene misurata in Ωm ed indica la resistenza R che la corrente incontra nell'attraversare una formazione rocciosa. Il valore di resistività che si misura è apparente perché le linee di corrente che consentono di valutare tale parametro attraversano più formazioni rocciose: quindi si misura un valore anomalo rispetto al valore che si misurerebbe in un sottosuolo omogeneo ed isotropo. Questo è definito da una funzione che dipende dalle resistività dei vari litotipi attraversati e dai loro spessori. Dato che la distribuzione della resistività apparente è legata allo spessore, alla localizzazione, alla forma e alla resistività dei litotipi che la corrente oltrepassa, la misura dà informazioni sulle discontinuità presenti nel sottosuolo. Quindi la resistività apparente viene definita come la resistività vera di una roccia immaginaria (omogenea ed isotropa) equivalente ad una reale eterogenea ed anisotropa⁴⁰.

Diversi sono i valori (*Tabella 2.1*) e gli intervalli di variazioni (*Figura 2.1*) di resistività per le rocce:

MATERIALE	ρ (Ωm)
Acqua di mare	< 0.2
Acqua con il 20% di Na Cl	$3 \cdot 10^{-2}$
Acqua pura	$102 \div 3 \cdot 10^3$
Calcari e dolomie	$100 \div 5000$
Arenarie	$60 \div 10^4$
Argille (acqua dolce)	$10 \div 120$
Argille (acqua salata)	$1 \div 10$
Marne	$2 \div 50$
Sabbia (da bagnata ad asciutta)	$100 \div 1000$
Graniti	$300 \div 10^4$ ed oltre
Basalti	$10 \div 10^5$
Quarziti	$2 \cdot 10^4$ ed oltre
Pirite	$10^{-4} \div 10$
Galena	$10^{-2} \div 300$
Grafite	$10^{-3} \div 1$
Bauxite	$200 \div 6000$

Tabella 2.1 - Valori di resistività di alcuni mezzi materiali.

³⁹ MAURIELLO - PATELLA 1999a; MAURIELLO 2002.

⁴⁰ ASTIER 1971.

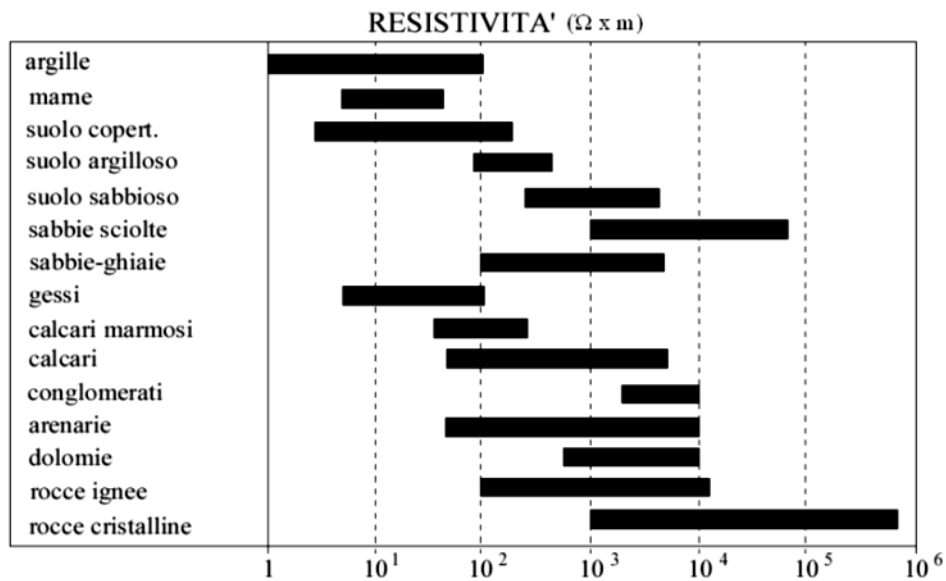


Figura 2.1 - Intervalli di variazione della resistività elettrica per varie rocce e terreni.

Tutte le rocce naturali conducono elettricità se sottoposte ad un campo elettrico e la misura con la quale le rocce si lasciano attraversare dalla corrente dipende dal tipo di resistività che esse presentano. La conducibilità nei solidi può avvenire tramite processi ionici o elettronici: nella maggior parte delle rocce, la conduzione avviene a livello dei legami ionici che interessano i reticoli cristallini. Essi presentano due importanti tipi di imperfezioni che consentono la conduzione di corrente: le originarie, inerenti la struttura cristallina stessa (sostituzione errata di valenze nel reticolo o la mancanza di ioni in esso), e le indotte, da variazioni di temperatura. Le imperfezioni fanno in modo che gli ioni possono perdere occasionalmente la loro posizione di equilibrio, tramite movimenti vibrazionali, per muoversi casualmente; in presenza di un campo elettrico questi seguiranno la direzione della corrente dando luogo ad un trasferimento di elettroni. Inducendo un aumento di temperatura cresce il grado di dissociazione ionica e dunque la resistività diminuisce a favore della conducibilità che aumenta.

Per comprendere come la corrente circola nel sottosuolo, il modo più semplice e chiaro è considerare l'invio del segnale in un terreno isotropico, completamente omogeneo e di resistività uniforme. Per la legge di Ohm, quando una differenza di potenziale elettrico, o voltaggio (ΔV), è applicato all'estremità di un campione, una corrente fluisce attraverso esso e l'intensità di corrente (I) dipende dalla resistenza del materiale. Quindi:

$$\Delta V = \rho I . \quad (4)$$

Inoltre se consideriamo un campione di roccia di forma cilindrica, di lunghezza L e sezione S (Figura 2.2), la resistenza elettrica R è espressa da:

$$R = \rho L / S \quad (5)$$

dove ρ è la resistività elettrica o resistenza specifica, costante caratteristica dei materiali che consente di campionare in modo standardizzato diversi tipi di roccia.

Dunque l'equazione (5) può anche essere scritta come

$$\Delta V / L = \rho I / S \quad (6)$$

oppure

$$\partial V / \partial L = \rho i = \rho I / S. \quad (7)$$

Quest'ultima è una formulazione più generale che mostra che il gradiente di potenziale $\partial V / \partial L = E$ (dove E è il campo elettrico), è dato dal prodotto della densità di corrente i (rapporto tra la corrente I e l'area S interessata dal passaggio della stessa) per la resistività ρ .

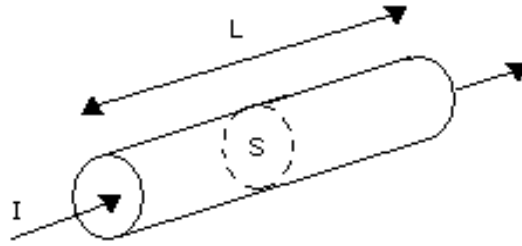


Figura 2.2 - La resistenza di un campione dipende dalle sue dimensioni.

Nel caso in cui, attraverso una sorgente puntiforme C_1 , si immette nel terreno una corrente di intensità $+I$, questa fluirà radialmente dal punto di immissione distribuendosi in modo uniforme su di una superficie semisferica di area $2\pi r^2$ (con r raggio della circonferenza) (Figura 2.3). Il gradiente di potenziale associato alla corrente sarà:

$$\partial V / \partial L = \rho I / 2\pi r^2. \quad (8)$$

Dall'integrazione di quest'ultima si ottiene il potenziale alla distanza r (al punto P , in (Figura 2.3), ed equivale a:

$$V = \rho I / 2\pi r. \quad (9)$$

Da tale equazione è possibile calcolare la differenza di potenziale tra i punti P_1 e P_2 causato dalla corrente $+I$ alla sorgente (nel punto entrante C_1):

$$\Delta V = I\rho/2\pi\left(\frac{1}{C_1P_1} - \frac{1}{C_1P_2}\right) \quad (10)$$

e allo stesso modo la differenza di potenziale tra P_1 e P_2 causato dalla corrente $-I$ alla fonte (nel punto di uscita C_2):

$$\Delta V = -I\rho/2\pi\left(\frac{1}{C_2P_1} - \frac{1}{C_2P_2}\right). \quad (11)$$

La differenza di potenziale totale tra P_1 e P_2 è, quindi, data dalla somma di entrambe le equazioni:

$$\Delta V = I\rho/2\pi\left(\frac{1}{C_1P_1} - \frac{1}{C_2P_1} - \frac{1}{C_1P_2} + \frac{1}{C_2P_2}\right). \quad (12)$$

oppure

$$\rho = k(\Delta V/I) \quad (13)$$

dove k è il coefficiente geometrico. Nel Sistema Internazionale (SI), l'unità di misura della resistività è l' Ohm×metro (Ωm).

Spesso al posto della resistività ρ si utilizza la conduttività elettrica (σ) (*Siemens/m*), che è il suo reciproco:

$$\sigma = 1/\rho. \quad (14)$$

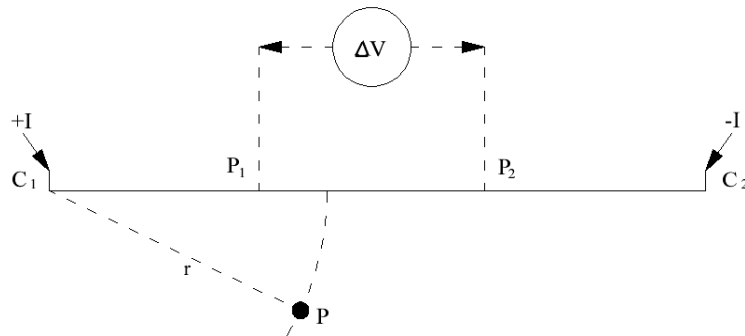


Figura 2.3 - Metodo di calcolo della distribuzione di potenziale.

Nel caso dell'equazione (12) il valore è stato ricavato teoricamente prendendo come esempio un terreno isotropico, completamente omogeneo e di resistività uniforme. Dunque in questo caso la conduzione elettrica segue un andamento normale, le linee di corrente si irradiano simmetricamente dal punto di immissione della corrente e

quest'ultima di conseguenza si distribuisce su di una semisfera. Le linee equipotenziali risultano essere perpendicolari all'intensità del campo elettrico in ogni suo punto (*Figura 2.4*).

Ovviamente nella realtà non ci sono suoli elettricamente omogenei, poiché questi sono composti da parti differenti dal punto di vista litologico: nel momento in cui viene immessa una corrente si verifica una variazione della conducibilità e quindi una distribuzione anomala del potenziale (*Figura 2.5*). Le anomalie sono il riflesso della distribuzione delle linee di corrente distorte dall'andamento normale, in quanto in presenza di un corpo più conduttivo rispetto alla matrice che lo contiene si verifica un addensamento delle linee di corrente su di esso, mentre, un corpo meno conduttivo respinge la corrente provocando un abbassamento della densità.

In altre parole il valore di resistività che si ottiene dall'equazione (12) andrà a rappresentare la resistività di un terreno omogeneo che darebbe il medesimo valore per la stessa configurazione elettrodica; ciò dipende dalle caratteristiche elettriche di tutta la porzione di terreno attraversata dalla circolazione di corrente. Si parla quindi di resistività apparente (ρ_a). Per ridurre il problema si cerca di acquisire il maggior numero di dati possibile in modo da poterli trattare, secondo modelli fisici-matematici, per la determinazione della composizione reale del sottosuolo attraverso i cosiddetti metodi di inversione dei dati a cui si accennerà nei paragrafi successivi.

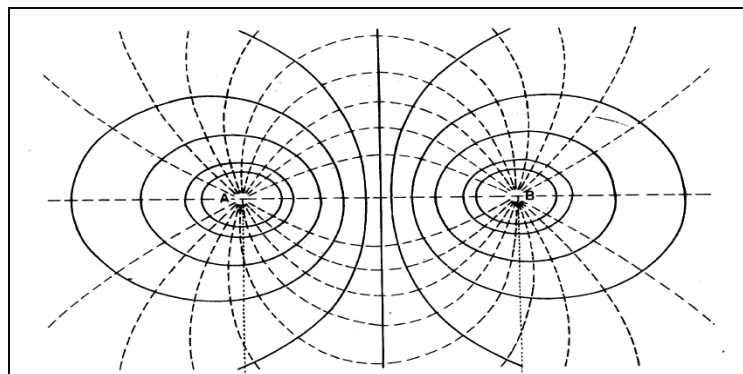


Figura 2.4 - Distribuzione delle linee di corrente in un terreno omogeneo (Clark, 1989).

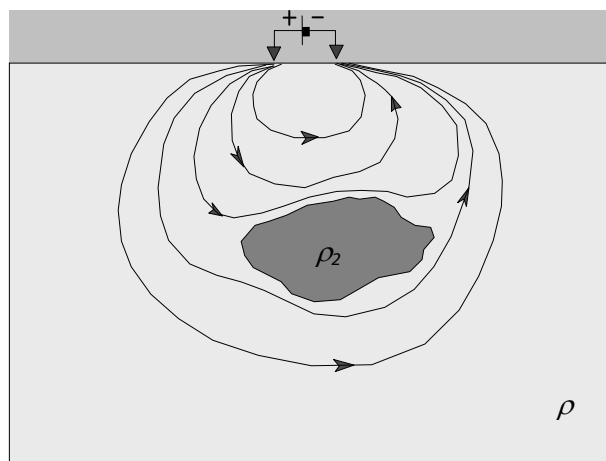


Figura 2.5 – Circolazione della corrente nel sottosuolo in presenza di un corpo ad alta resistività (Compare, 2007).

2.4.2 CONFIGURAZIONI ELETTRODICHE

In base a come vengono disposti gli elettrodi di corrente la metodologia di acquisizione può variare assumendo diverse configurazioni. Le più comuni sono quella di Wenner, Schlumberger, quadripolo dipolo-dipolo, quadripolo polo-dipolo e il quadripolo del gradiente mobile. La scelta di utilizzare una configurazione piuttosto che un'altra è determinante e deve essere fatta tenendo in considerazione diversi tipi di fattori: la natura delle strutture da rilevare, la profondità che si vuole raggiungere, la sensibilità dello strumento adoperato, il livello di rumore di fondo, la percettibilità delle variazioni della resistività laterali e verticali del tipo di dispositivo scelto, la logistica dell'area e la potenza del segnale di energizzazione.

Dunque a seconda della disposizione adottata il valore della resistività apparente (ρ_a) verrà calcolato utilizzando l'equazione (14) attribuendo un valore adeguato del coefficiente geometrico k . I dispositivi elettronici più comuni sono:

- Quadripolo di Wenner: gli elettrodi vengono allineati mantenendo una distanza costante (Figura 2.6) e dunque i termini C_1P_1 , C_2P_1 , C_1P_2 , C_2P_2 dell'equazione (14) per il calcolo della resistività apparente assumono lo stesso valore indicato con a . Da questo allineamento è possibile ottenere tre combinazioni variando la posizione degli elettrodi che vengono indicate con alfa, beta e gamma. Nonostante il Wenner è tra tutti quello con il rapporto segnale/rumore più vantaggioso, non produce rappresentazioni molto soddisfacenti per l'individuazione di strutture geologiche e archeologiche per

le profondità elevate. Inoltre, lo svantaggio è che l'utilizzo di questa configurazione comporta una scarsa copertura orizzontale all'aumentare della spaziatura elettrodica; cioè a parità di lunghezza dello stendimento allargando i dipoli si dispone di un numero inferiore di misure. Nel caso di una struttura laminare, con alta resistività e posizionata ad una modesta profondità al centro del quadripolo della configurazione alfa, provoca poco disturbo alla distribuzione di corrente mentre se essa è posizionata tra gli elettrodi P_2 e C_2 causa un disturbo maggiore causando un aumento della differenza di potenziale tra P_1 e P_2 . Se la struttura è conduttrice si avrà una distorsione delle linee di corrente maggiore rispetto ad un corpo non conduttivo. Il coefficiente geometrico dipende da a .⁴¹.

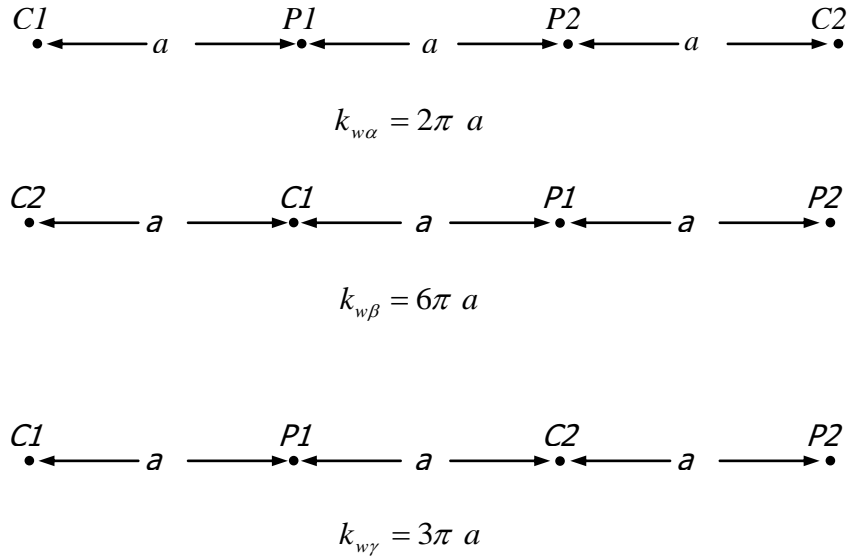
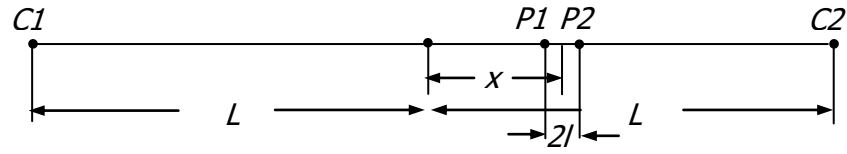


Figura 2.6- Quadripolo di Wenner.

- Quadripolo di Schlumberger: in questo caso la distanza tra gli elettrodi energizzanti C_1C_2 è maggiore rispetto a quella degli elettrodi potenziometrici P_1P_2 . Questa configurazione viene utilizzata soprattutto per sondaggi elettrici verticali, ma può essere adoperata anche nell'acquisizione di profili. Spesso la configurazione è simmetrica e $x = 0$ (Figura 2.7).

⁴¹ COMPARE 2007.



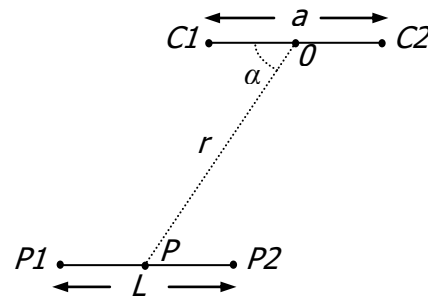
$$k_s = \frac{\pi}{2l} \frac{(L^2 - x^2)^2}{(L^2 + x^2)}$$

Figura 2.7- Quadripolo di Schlumberger.

Come per il dispositivo precedente si ha un buon rapporto segnale/rumore, ma il dover utilizzare cavi molto lunghi per gli elettrodi di corrente comporta delle difficoltà nelle operazioni in campagna⁴². Inoltre a causa della piccola distanza fra gli elettrodi potenziometrici tale disposizione è molto adatta per la definizione di piccole strutture.

- Quadripolo dipolo-dipolo: in questa configurazione gli elettrodi di corrente sono molto distanti rispetto agli elettrodi potenziometrici. A seconda dell'allineamento delle due coppie di elettrodi si può avere:

- 1) disposizione radiale: gli elettrodi potenziometrici P_1P_2 sono collocati secondo r (distanza di P , centro di P_1P_2 , dal punto di mezzo di C_1C_2 , O) dove α rappresenta l'angolo C_1OP (Figura 2.8).



$$k_{DDrad} = (\pi r^3 / aL \cos \alpha)$$

Figura 2.8- Quadripolo dipolo-dipolo radiale.

- 2) disposizione azimutale: gli elettrodi P_1P_2 sono perpendicolari ad r (Figura 2.9).

⁴² COMPARE 2007.

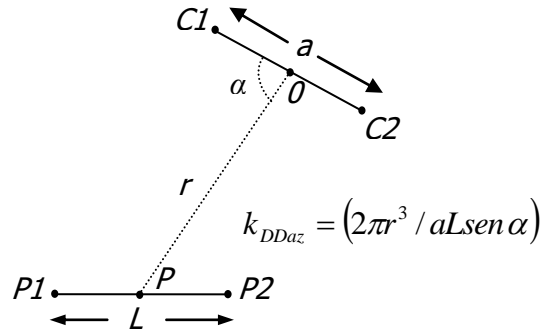


Figura 2.9 – Quadripolo dipolo-dipolo azimutale.

- 3) disposizione assiale equatoriale: gli elettrodi P_1P_2 sono perpendicolari all'asse di C_1C_2 (Figura 2.10).

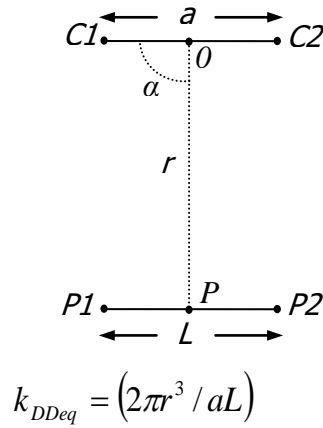


Figura 2.10 – Quadripolo dipolo-dipolo equatoriale.

- 4) disposizione assiale o polare: gli elettrodi P_1P_2 sono allineati con gli elettrodi C_1C_2 (Figura 2.11). Con questa disposizione $L = a$ e na è la distanza tra gli elettrodi interni (l'uno di potenziale, l'altro di energizzazione).

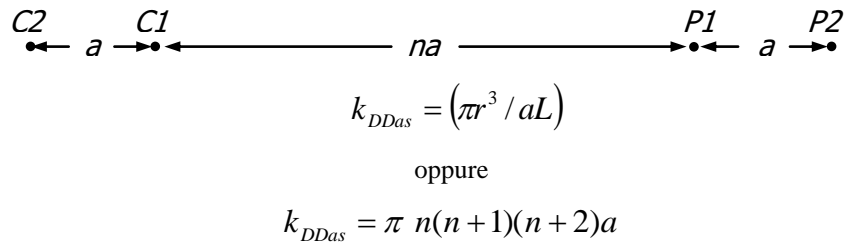


Figura 2.11 – Quadripolo dipolo-dipolo assiale o polare.

La configurazione più utilizzata è quella assiale poiché è molto sensibile alle variazioni laterali della resistività⁴³, non richiede cavi molto lunghi, ma ha lo svantaggio di registrare le misure con crescente rumore all'aumentare di n (distanza tra la coppia energizzante e quella ricevente); in questo caso la differenza di potenziale è inversamente proporzionale al cubo del fattore n . Essa inoltre è più sensibile tra C_1 e P_2 mentre la sensibilità tra C_1 e P_1 è molto piccola a causa della distanza di P_1 . Dal momento che gli elettrodi di corrente sono molto vicini, la penetrazione di corrente è limitata e per questo motivo essa è adatta per indagare corpi sepolti poco profondi.

- Quadripolo polo-dipolo: è una disposizione asimmetrica con un elettrodo posto ad una elevata distanza rispetto agli altri (*Figura 2.12*). Con a viene indicato la distanza tra C_1P_1 e con b quella tra C_1P_2 , le distanze C_2P_1 e C_2P_2 vengono poste uguali ad infinito. Il rapporto segnale/rumore è più basso rispetto al Wenner, ma migliore rispetto al dipolo-dipolo assiale, infatti la caduta di potenziale diminuisce con il quadrato di n . Come svantaggio, oltre al fatto di avere un cavo lungo tra C_1 e C_2 , il dispositivo è asimmetrico e in alcuni casi i risultati ottenuti utilizzando questa configurazione risentono di tale asimmetria. Se si vogliono eliminare tali distorsioni bisogna ripetere le misure utilizzando una disposizione speculare degli elettrodi⁴⁴ raddoppiando il tempo di acquisizione.

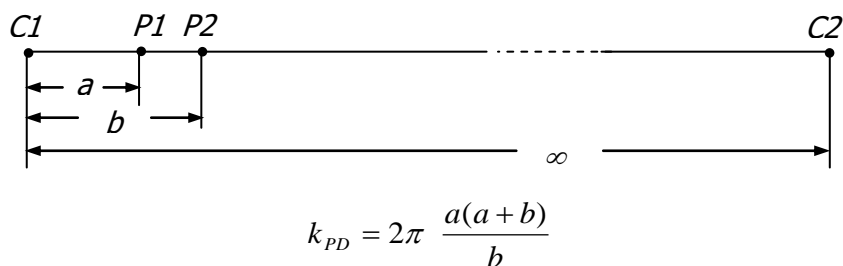


Figura 2.11 - Quadripolo di polo-dipolo.

- Quadripolo del gradiente mobile: disposizione come *Figura 2.12*.

⁴³ PARASNIS 1997.

⁴⁴ LOKE 2004.

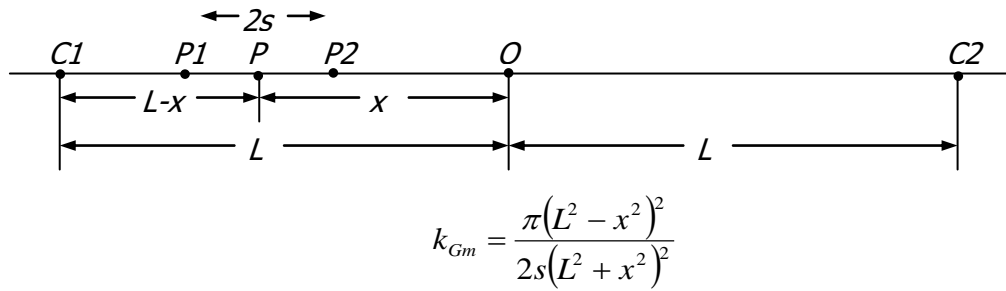


Figura 2.12 – Quadripolo del gradiente mobile.

Gli elettrodi C_1 e C_2 , mantenuti fissi, vengono posti alle estremità del profilo, mentre gli elettrodi potenziometrici, con spaziatura costante, vengono mossi da un lato all'altro della linea. Il vantaggio di tale configurazione rispetto al dispositivo dipolo-dipolo è quello di fornire misure con un rumore minore.

Generalmente in campo archeologiche il dispositivo che fornisce risultati migliori è il quadripolo dipolo-dipolo assiale, poiché risulta sensibile alle variazioni di resistività laterali e non richiede lo stendimento di cavi molto lunghi dato che la distanza tra le coppie di elettrodi viene mantenuta costante. In *Figura 2.13* è riportato lo schema di acquisizione utilizzato per tale configurazione: la successione delle misure prevede che, gli elettrodi energizzanti vengono mantenuti fissi mentre quelli potenziometrici vengono mossi di una distanza $1n$, $2n$, $3n$, e così via fino alla fine dello stendimento (n corrisponde alla distanza interelettrodica). Successivamente si spostano gli elettrodi energizzanti di una posizione e si ripetono le misure variando la distanza sempre nello stesso modo fino a quando i quattro elettrodi sono posizionati alla fine dello stendimento. L'incremento della distanza tra le due coppie elettrodiche è realizzato allo scopo di interessare porzioni di terreno sempre maggiori alla circolazione di corrente, determinando in questo modo valori della resistività apparente che saranno riferiti a profondità via via crescenti.

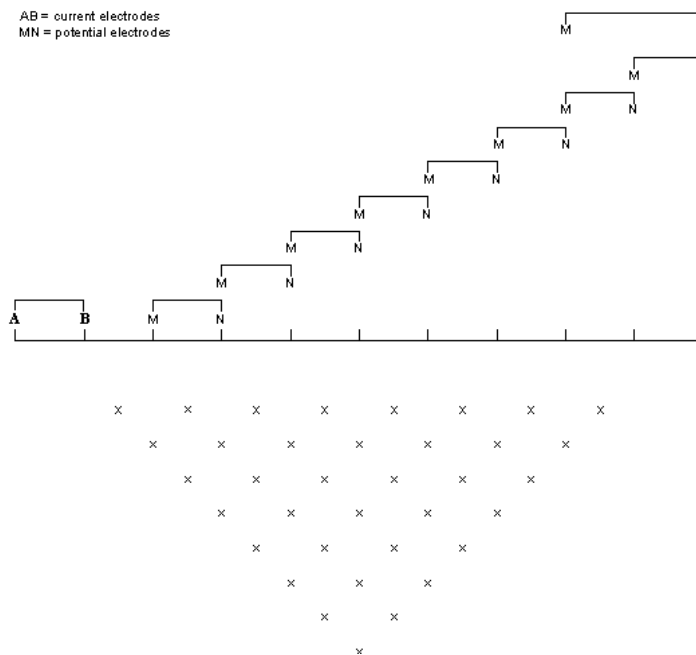


Figura 2.13 - Schema di acquisizione utilizzato per la configurazione dipolo-dipolo assiale

2.4.3 LA STRUMENTAZIONE

Fino agli anni 70 lo strumento prescelto per le misure geoelettriche è stato il potenziometro, con un registratore che forniva il segnale su carta permettendo una valutazione del segnale e del valore di resistività apparente calcolato. A partire dai primi anni ottanta sono comparsi i primi strumenti automatici di tipo monocanale, che segnalavano direttamente il valore della resistività apparente, e negli anni novanta quelli multicanale, che consentono l'acquisizione contemporanea di più segnali. Queste strumentazioni hanno consentito lo sviluppo di una nuova tecnica d'indagine, la tomografia elettrica⁴⁵.

Oggigiorno sono numerose le aziende che propongono sul mercato internazionale diverse strumentazioni per l'indagine geoelettrica, come Abem Instruments (Svezia), Advanced Geophysical Instruments (USA), Campus Geophysical Instruments (UK), Geofyzika (Repubblica Ceca), GF Instruments (Repubblica Ceca), Geometrics (USA), Geolog (Germania), IDS Scintrex (Canada), Iris Instruments (Francia), OYO (Giappone), Pasi Geofisica (Italia), MAE srl (Italia).

Il tipo di strumento più diffuso è di tipo statico, caratterizzato da numerosi elettrodi collegati ad un cavo multi-polare che vengono infissi nel terreno per l'acquisizione dei

⁴⁵ MUSMECI – RIZZO 2004.

dati, in modo da ottenere una copertura più larga sfruttando un maggior numero di nodi. I sistemi dinamici, mentre, prevedono l'uso di un minor numero di nodi che vengono spostati lungo il profilo per ottenere la copertura prevista⁴⁶.

Per quanto riguarda l'acquisizione dei dati, grazie allo sviluppo dei moderni sistemi computerizzati, la registrazione delle informazioni risulta essere completamente automatica: l'unità di controllo raccoglie i dati da una sequenza predefinita di schiere di elettrodi con geometrie diverse⁴⁷.

Negli ultimi anni è stato sviluppato un altro tipo di sistema definito mobile, per il quale non è previsto un contatto diretto con il terreno ma usa l'accoppiamento capacitivo per ridurre il passaggio di corrente nel suolo⁴⁸, come il sistema Ohm-Mapper Geometrics e il sistema Corim. In questo caso il cavo può essere formato da 4 a 8 elettrodi, richiede l'impiego di un solo operatore, rispetto ai sistemi con contatto diretto la profondità raggiungibile è limitata (poiché la quantità di corrente immessa è minore) e può essere utilizzato solo in aree asfaltate.

Nel 2001 nasce il sistema ARP © (Automatic resistività Profiler): sviluppato presso l'Università di Parigi dal gruppo coordinato da Michel Dabas, venne usato prima in agricoltura e nel 2004, a seguito di una serie di sperimentazione, anche in archeologia⁴⁹. Questo sistema è di tipo multipolare a V, utilizza tre profondità di indagine in modalità continua ed è caratterizzato da un dipolo trasmittente e tre dipoli ricevitori trainati da un fuoristrada⁵⁰.

Nell'ambito di questa ricerca sono stati utilizzati un resistivimetro portatile in corrente alternata, chiamato ADD-01, e un resistivimetro multicanale in corrente continua, definito A-3000E. La prima macchina (*Figura 2.14*) è caratterizzata da l'unità di controllo e il generatore divisi e capaci di comunicare per mezzo di un dispositivo a radiofrequenze. Le due parti possono così essere utilizzate da due operatori che non sono vincolati dalla presenza di cavi tra unità centrale e generatore. Il peso e le dimensioni sono molto contenuti e consentono estrema facilità nel trasporto e nell'utilizzo in campagna (potenza 50W, frequenza tra 8 e 33Hz). I valori di differenza di potenziale misurati vengono immagazzinati in una memoria interna assieme ai valori

⁴⁶ LOKE 2004

⁴⁷ KURAS 2002.

⁴⁸ GERARD - TABBAGH 1991; SHIMA *et alii* 1996; PANISSOD *et alii* 1998.

⁴⁹ DABAS 2009

⁵⁰ PANISSOD *et alii* 1997; DABAS 2009.

di due indici che corrispondono agli spostamenti, secondo intervalli regolari, delle due coppie di elettrodi formati da barre di acciaio la cui estremità appuntita facilita l'immissione di corrente nel terreno e garantisce una buona aderenza tra elettrodo e superficie.

L'altra strumentazione è un resistivimetro multicanale (modello A-3000E) (*Figura 2.14*), prevede invece l'infissione nel terreno di tutti gli elettrodi necessari alla realizzazione del profilo elettrico, collegati alla strumentazione mediante un cavo multipolare, in modo da immagazzinare un'elevata sequenza di dati in maniera molto dettagliata; il principio di funzionalità e applicabilità è lo stesso del precedente.



Figura 2.14 - A destra il modello A3000-E, a sinistra l'ELMES ADD-01.

2.4.4 TECNICA DELLA PSEUDOSEZIONE E ELABORAZIONE DI MAPPE TOMOGRAFICHE

Le misure in campo vengono diagrafate indicando sull'asse delle ascisse le posizioni degli elettrodi, e su quella della ordinata i valori di resistività apparente ottenuti a varie profondità

Per la configurazione dipolo-dipolo assiale, adottata nell'ambito della tesi, dalle misure di campo si ottengono un insieme di dati relativi alla resistività apparente $\rho_a(l, n)$ dove l è la posizione lungo l'asse x che definisce il profilo e n è la pseudo-profondità lungo l'asse verticale z , positiva verso il basso (*Figura 2.15*).

Segnalando i punti di intersezione di due semirette con pendenza di 45° partendo dai centri dei dipoli di energizzazione e ricezione, si crea una maglia con numerosi punti ai quali riferire i risultati

Ogni singola misura ρ_a sarà associata al punto P di coordinate:

$$P_x = \frac{1}{2} \left(\frac{A+B}{2} + \frac{M+N}{2} \right) \quad (15)$$

$$P_z = \frac{1}{2} \left(\frac{A+B}{2} - \frac{M+N}{2} \right) \quad (16)$$

dove A, B, N, M rappresentano le posizioni degli elettrodi come schematizzato in *Figura 2.15*.

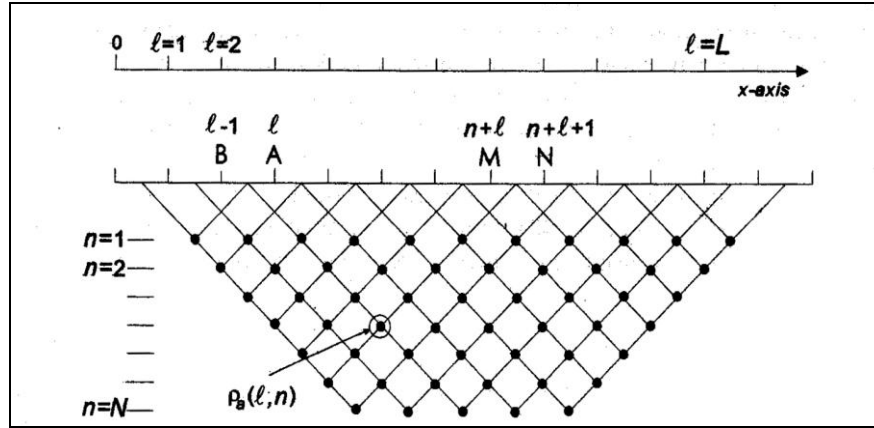


Figura 2.15 – Pseudosezione dipolo-dipolo assiale.

Unendo poi i punti di egual parametro è possibile tracciare le curve di iso-resistività (*Figura 2.16-alto*) e adottare un'opportuna scala cromatica per colorare le aree poste tra le varie iso-resistive (*Figura 2.16-basso*). Tali rappresentazioni prendono il nome di pseudosezioni. Ricordiamo che le immagini ottenute non rappresentano sezioni reali poiché: la posizione in cui i valori vengono mostrati è stabilita da una convenzione e non da ragionamento fisico, quindi non si esclude che in quella stessa posizione possano essere presenti corpi con proprietà completamente differenti; le anomalie individuate sono affette dalle tipiche deformazioni dovute dalle caratteristiche del dispositivo di misura e non si trovano realmente in quella determinata profondità⁵¹. Nonostante ciò diversi autori⁵² ritengono che esse possano essere considerate come rappresentazioni della situazione elettrica del sottosuolo utili per una preliminare interpretazione. Generalmente sono eseguiti una serie di profili disposti secondo una griglia più o meno regolare, dunque risulta utile produrre delle mappe tomografiche che esprimano i valori di resistività relativi ad una certa profondità. Queste mappe non sono altro che sezioni orizzontali che permettono l'individuare degli andamenti geometrici attribuibili, con maggiore certezza, a strutture di natura antropica. Per la loro realizzare bisogna conoscere, le coordinate spaziali dell'origine e la direzione di ciascun profilo realizzato.

⁵¹ COMPARE 2007.

⁵² CAMMARANO *et alii* 1998.

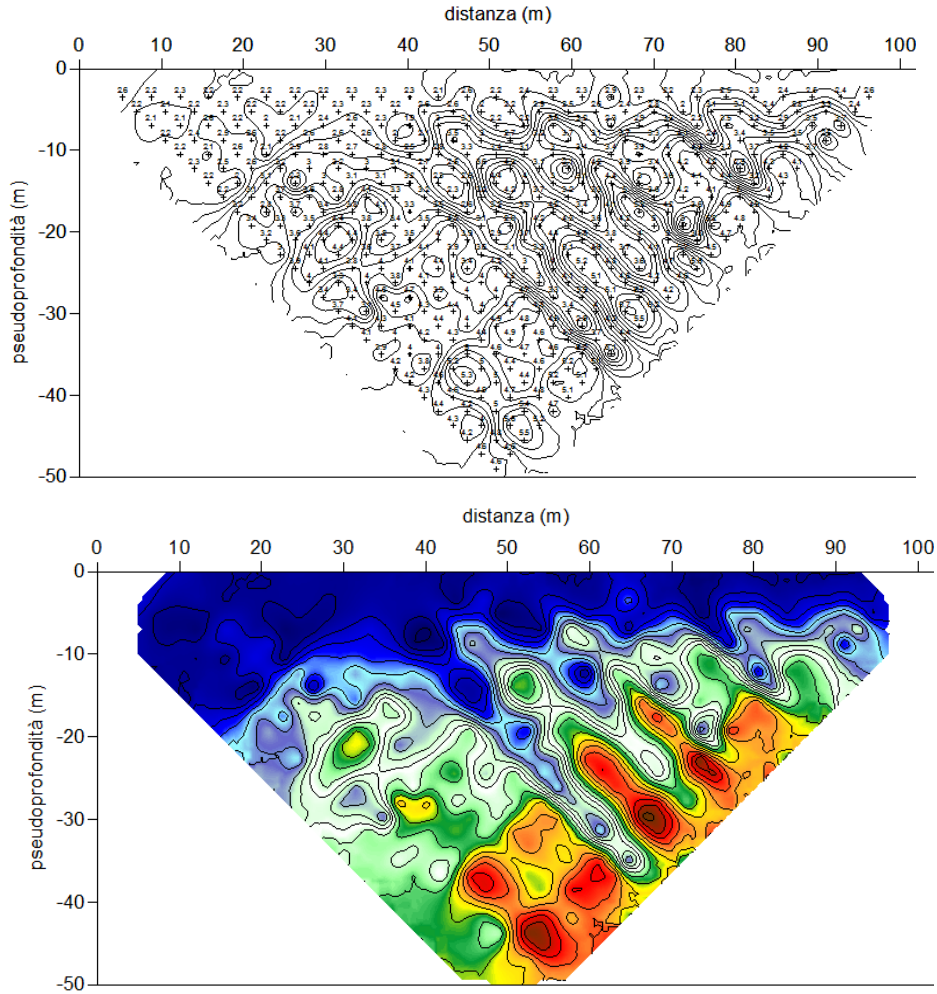


Figura 2.16 - Esempio di pseudosezione di resistività.

In questo modo se indichiamo con P_x e P_z le coordinate dei punti della pseudosezione, nelle sezioni orizzontali, lasciando invariate le profondità e indicando con d la distanza tra il punto misura P e l'origine A della sezione (Figura 2.17), la misura generica individuata da P nel nuovo sistema di riferimento avrà coordinate:

$$P'_x = x_A + \frac{P_x(x_B - x_A)}{l} \quad (17)$$

$$P'_y = y_A + \frac{P_x(y_B - y_A)}{l} \quad (18)$$

$$P'_z = P_z \quad (19)$$

dove l è la distanza tra i punti A e B , espressa da:

$$l = \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2} . \quad (20)$$

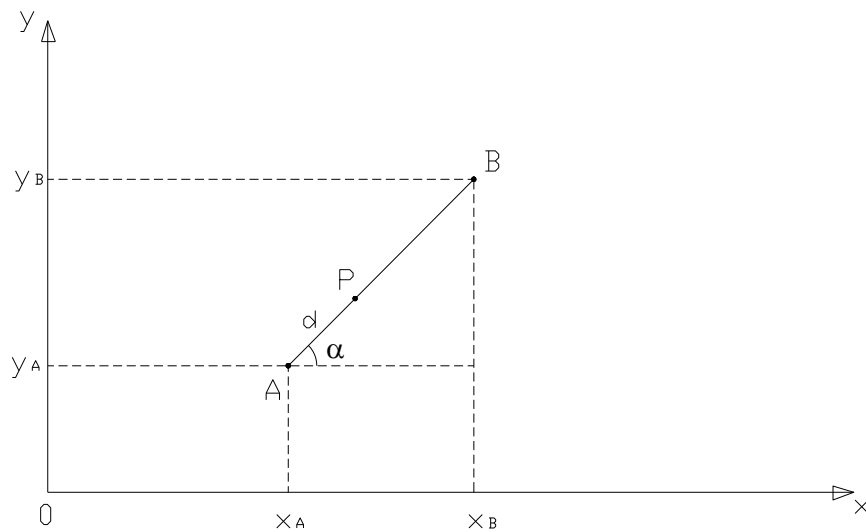


Figura 2.17– Sezione elettrica AB.

L'intero set di dati di resistività vengono processati con opportuni software di elaborazione che permettono di ottenere un tomospazio del volume investigato (*Figura 2.18*), una matrice 3D dell'insieme dei profili, dal quale estrarre una serie di sezioni verticali e orizzontali a profondità crescenti (*Figura 2.19*) con lo scopo di meglio evidenziare le relazioni spaziali tra le anomalie presenti nel sottosuolo.

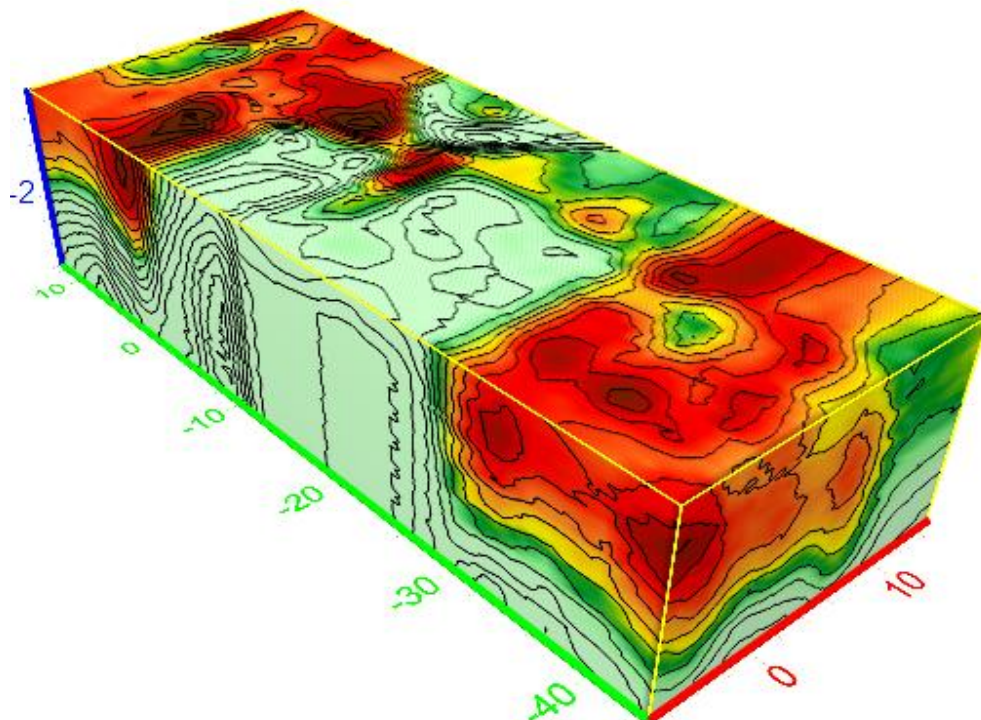


Figura 2.18– Tomospazio del volume del sottosuolo.

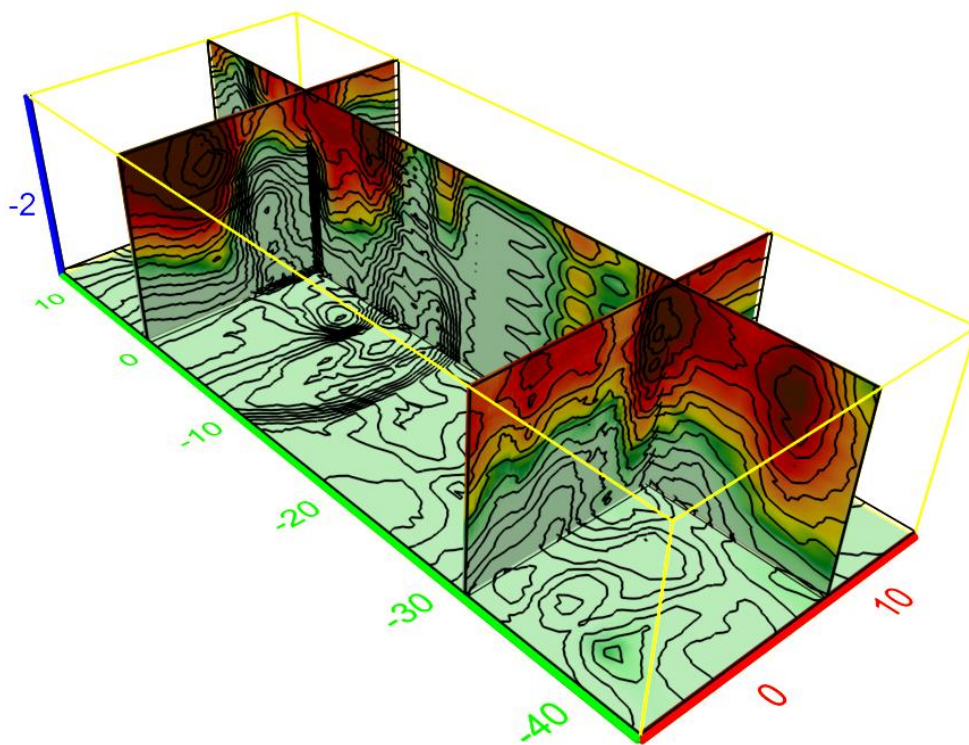


Figura 2.19 - Taglio delle sezioni.

2.4.5 INVERSIONE DEI DATI

I dati ricavati da una indagine geoelettrica forniscono informazioni circa la distribuzione del potenziale o, analogamente, sulla distribuzione della resistività apparente nel sottosuolo. Per poter ricostruire l'andamento delle resistività "reali" nel sottosuolo bisogna analizzare i dati applicando un insieme di tecniche matematiche al fine di ottenere informazioni utili sulla realtà fisica che ha determinato l'andamento del dato misurato.

La caratteristica delle indagini geofisiche risiede nel fatto che le proprietà dell'oggetto scopo dell'indagine non possono essere misurate direttamente, ma si può soltanto valutare l'effetto della sua presenza per mezzo di misure indirette.

Esiste una funzione matematica che lega le quantità misurate (dati) e le quantità che si vogliono conoscere (modello): $dati = f(modello)$. Tale operazione rappresenta il cosiddetto "problema diretto": noto il modello è possibile risalire facilmente ai dati che lo hanno prodotto. In effetti però avviene il contrario: si deve risolvere quello che in letteratura viene chiamato "problema inverso" in cui si conoscono i dati acquisiti in

campagna e si deve risalire al modello che li ha generati. La relazione è dunque del tipo:
 $modello = f^{-1}(dati)$.

Per creare una tomografia di resistività elettrica (ERT) bisogna avere a disposizione il maggior numero di dati inerente alla resistività apparente del sottosuolo; da qui viene effettuata un'inversione congiunta di tutti i singoli test utilizzando un algoritmo per individuare le più piccole differenze esistenti nei parametri acquisiti. Dall'inversione di un set di dati di resistività apparente si può ottenere una tomografia ERT bidimensionale (2D); se invece si assembla un insieme di profili paralleli, l'inversione dell'intero set di dati di resistività apparente fornisce un ERT tridimensionale (3D).

Secondo Menke⁵³ il problema inverso consiste nella ricostruzione della stessa resistività elettrica nel sottosuolo che ha fornito i dati della resistività apparente osservata nel nostro modello. Nell'inversione geofisica bisogna cercare un modello capace di dare una risposta quanto più simile ai valori effettivamente misurati, dove per modello si intende una rappresentazione matematica idealizzata di una sezione della terra in cui sono espressi i valori delle grandezze fisiche stimate dai dati raccolti. Tutti i metodi di inversione cercano di determinare un modello per il sottosuolo che concordi con i dati misurati⁵⁴.

L'inversione di resistività è un tipico problema sovra-determinato e non lineare; per semplificare la sua risoluzione esso viene modificato in maniera interattiva così che la differenza tra il modello di risposta e i valori dei dati osservati sia ridotta.⁵⁵

Il legame matematico tra i parametri del modello e il modello di risposta è definito dal metodo della differenza-finita⁵⁶ o dal metodo degli elementi-finiti⁵⁷.

Una delle procedure di inversione più usata è il metodo di ottimizzazione dei minimi quadrati (*least-squares method*) di Gauss-Newton⁵⁸ poiché grazie alla sua vasta gamma di applicazioni si è rilevato uno dei più efficaci. Questa tecnica venne successivamente ottimizzata nell'inversione di Occam in modo che la variazione dei valori di resistività del modello avvengano in maniera graduale e uniforme⁵⁹. Dal momento che il numero

⁵³ MENKE 1989.

⁵⁴ LOKE 2004.

⁵⁵ SASAKI 2006, PIDLISECKY *et alii* 2007; MARESCOT 2008.

⁵⁶ DEY - MORRISON 1979A, 1979B.

⁵⁷ SILVESTER - FERRARI 1990.

⁵⁸ LINES - TREITEL 1984.

⁵⁹ CONSTABLE *et alii*. 1987; DE GROOT *et alii* 1990.

dei parametri da invertire è considerevole, soprattutto nei 3D, questa procedura richiede molto tempo per l'elaborazione dei dati e ciò la rende poco pratica.

Un modo efficace e veloce per trattare i dati 2D e 3D deriva da una forma linearizzata del problema non lineare. A tal proposito sono proposti diversi metodi che riducono notevolmente il tempo informatico necessaria per generare un modello approssimato.

In particolare Loke e Barker hanno implementato un veloce e versatile algoritmo d'inversione dei minimi quadrati che usa una tecnica di ottimizzazione, chiamata quasi-Newton, per stimare una matrice Jacobiana delle derivate parziali durante ogni iterazione⁶⁰. Oltre a Loke e Barker si ricordano i contributi sugli algoritmi di inversione proposti da Smith e Vozoff (1984), Li e Oldenburg (1994b), Dabas et al. (1994), Ellis e Oldenburg (1994b), Tsourlos (1995) e Zhang et al. (1995). In realtà questo tipo di inversione consente di fornire informazioni relative ai parametri sconosciuti da inserire nel modello, piuttosto che di fornire il modello stesso. Il metodo ha delle limitazioni molto forti che dipendono dai principi fisici alla base del metodo e sono assolutamente insuperabili. L'aspetto fondamentale del problema è che, in queste procedure di inversione, viene assegnato un ruolo puramente deterministico al processo di interpretazione la cui conseguenza principale è la non unicità dei risultati: più modelli possono generare lo stesso set di dati all'interno dell'errore sperimentale, sia pur piccolo, connesso alla misura. Questo comporta che il problema sia vincolato da un modello di partenza scelto a priori come input del processo: se cambia il modello di partenza cambia il risultato finale. Un altro problema, sia di calcolo che di principio, riguarda il modo di operare l'inversione, che avviene effettuando l'inversione della matrice Jacobiana del sistema: l'inversione è un processo estremamente instabile che risulta possibile solo introducendo i cosiddetti *damping factors*, che non sono altro che dei filtri e dei vincoli all'interno dell'algoritmo di inversione. Se vengono cambiati questi, cambia di nuovo il risultato dell'inversione.

Oltre alle tecniche di inversione appena descritte, esistono altri sistemi il cui scopo è quello di avere immagini approssimative di modelli di resistività del sottosuolo in tempi brevi. Tuttavia, anche se si riescono ad indicare le zone ad alta o bassa resistività i

⁶⁰ LOKE - BARKER 1996.

alori di resistività non sono corrispondenti a quelli reali e il gradiente resistività è generalmente molto inferiore allo stesso gradiente ottenuto dai modelli “classici”⁶¹.

Ad esempio recentemente è stata sviluppata una procedura chiamata *filtered back-projection resistivity technique* (BPRT). Il procedimento si basa sulla convoluzione dei dati sperimentali con una funzione filtro calcolata sulla base di fattori di sensitività per ogni *voxler* sui vari dati di resistività. Il calcolo dei fattori di influenza in un set discreto di punti rappresentativi (centri dei *voxler* da utilizzare nella *back-projection*) è basato sull'integrale della *influence density function* sul volume di ogni *voxler*⁶². In un recente lavoro Martorana e Capizzi⁶³ descrivono l'implementazione di questa tecnica considerando due fasi, in modo da ottenere prima una riduzione dei quadrati dall'inversione completa della matrice e poi, sulla base dei risultati, si applica un algoritmo di filtraggio alla matrice Jacobiana per facilitarne l'inversione. Ciò permette di elaborare insieme i dati bidimensionali relativi ad una resistività apparente, al fine di realizzare velocemente un'immagine con i diversi contrasti di resistività utilizzabile per dei controlli rapidi dei dati o come modello base per fissare una procedura di inversione. Un altro studio per ottenere un'immagine semplice e veloce dei dati di resistività è stato sviluppato da Mauriello e Patella nel 1999 con lo scopo di ottenere la “probabilità di occorrenza” di una anomalia di resistività (RAOP) in qualsiasi luogo del volume investigato⁶⁴. Emerge chiaramente che esso non necessita di alcun vincolo a-priori ed è totalmente svincolato dal particolare sistema geometrico di misura e dalle condizioni del terreno. Per un set di dati di resistività apparente si ottiene un unico modello espresso in termini di probabilità. Il fatto di non restituire valori reali di resistività non va visto come una limitazione dell'algoritmo dato che, comunque, le reali resistività non sono mai ottenibili, ma come la intrinseca natura del processo di misura geoelettrica, che per problemi di equivalenza contiene comunque un insieme di modelli che generano lo stesso set di dati. In tutti i casi in cui è stato adoperato⁶⁵, il sistema si è rilevato risolutivo per l'individuazione delle probabili posizioni delle sorgenti anomale. Al fine di rendere quanto più reali le anomalie di resistività, Mauriello e Patella hanno proposto

⁶¹ MARTORANA *et alii* 2014.

⁶² COSENTINO *et alii* 1995, 1997, 1998.

⁶³ MARTORANA - CAPIZZI 2014.

⁶⁴ MAURIELLO *et alii* 1998, 1999a, 1999b.

⁶⁵ Cft. CAMMARANO *et alii* 2000; DI FIORE *et alii* 2002; ALAIA *et alii* 2008.

nel 2009 un algoritmo di inversione di probabilità (PERTI) basato sul metodo ERT⁶⁶. Lo scopo era quello di combinare l'elevata potenza di risoluzione geometrica della tomografia di probabilità con la necessità di ricostruire il modello più probabile di resistività⁶⁷. Tale algoritmo, la cui teoria viene riportata in Appendice 1, è stato utilizzato in questa tesi per il trattamento dei dati dei vari casi studio.

2.4.6 DALL'ELABORAZIONE ALL'INTERPRETAZIONE DEL DATO GEOFISICO

Le rappresentazioni grafiche dei dati diventano sempre più importanti nel settore dei Beni Culturali, ma la loro restituzione, rappresentata dalle mappe tematiche, agli occhi dei meno esperti non sempre restituisce un risultato chiaro e soddisfacente.

Per facilitare la lettura delle mappe e renderle esaustive, al fine di arrivare ad un'attribuzione archeologica, occorre effettuare un'interpretazione delle concentrazioni dei valori alto o basso resistivi evidenziate e fornire una discussione finale dei risultati. Per un corretto studio interpretativo delle anomalie bisogna sempre ricordare che non sono tanto le variabili del parametro fisico a darci informazioni sul "sepolto" ma le geometrie (forme) e gli allineamenti che si ottengono.

Diversi sono i prodotti che si possono ricavare per fornire una visione più completa del volume investigato. Grazie a opportuni software è possibile implementare gli algoritmi di calcolo dalla versione 2D a quella 3D consentono la visualizzazione tridimensionale delle mappe geofisiche sia attraverso più sezioni verticali poste a varie profondità sia attraverso mappe orizzontali; la rappresentazione avviene mediante nuvole di punti, isosuperfici, isolinee, piani obliqui. Ciò permette di descrivere i targets con maggiore accuratezza rispetto alle tecniche 2D e di poterli interpretare con facilità.

Tutti gli elaborati fanno riferimento all'applicazione di una scala cromatica che ci aiuta ad interpretare la resistività dei corpi sepolti: i colori evidenziano come le anomalie conduttive, cioè le zone di resistività bassa, sono rappresentate con gradazioni in verde chiaro o talvolta sono oscurati, quelli resistivi, con alti valori di probabilità, sono colorati con gradazioni di rosso.

Il modo più semplice e comune per restituire una tomografia consiste in una mappa bidimensionale ricavata ad una profondità stabilita, sulla quale vengono segnate ed

⁶⁶ MAURIELLO - PATELLA 2009.

⁶⁷ COZZOLINO *et alii* 2012, 2013.

interpretate le anomalie più significative (*Figura 2.20*). Dalla stessa tomografia si possono generare una serie di viste 3D a seconda del risultato che si desidera e per mettere meglio in evidenza i valori di resistività (*Figura 2.21*).

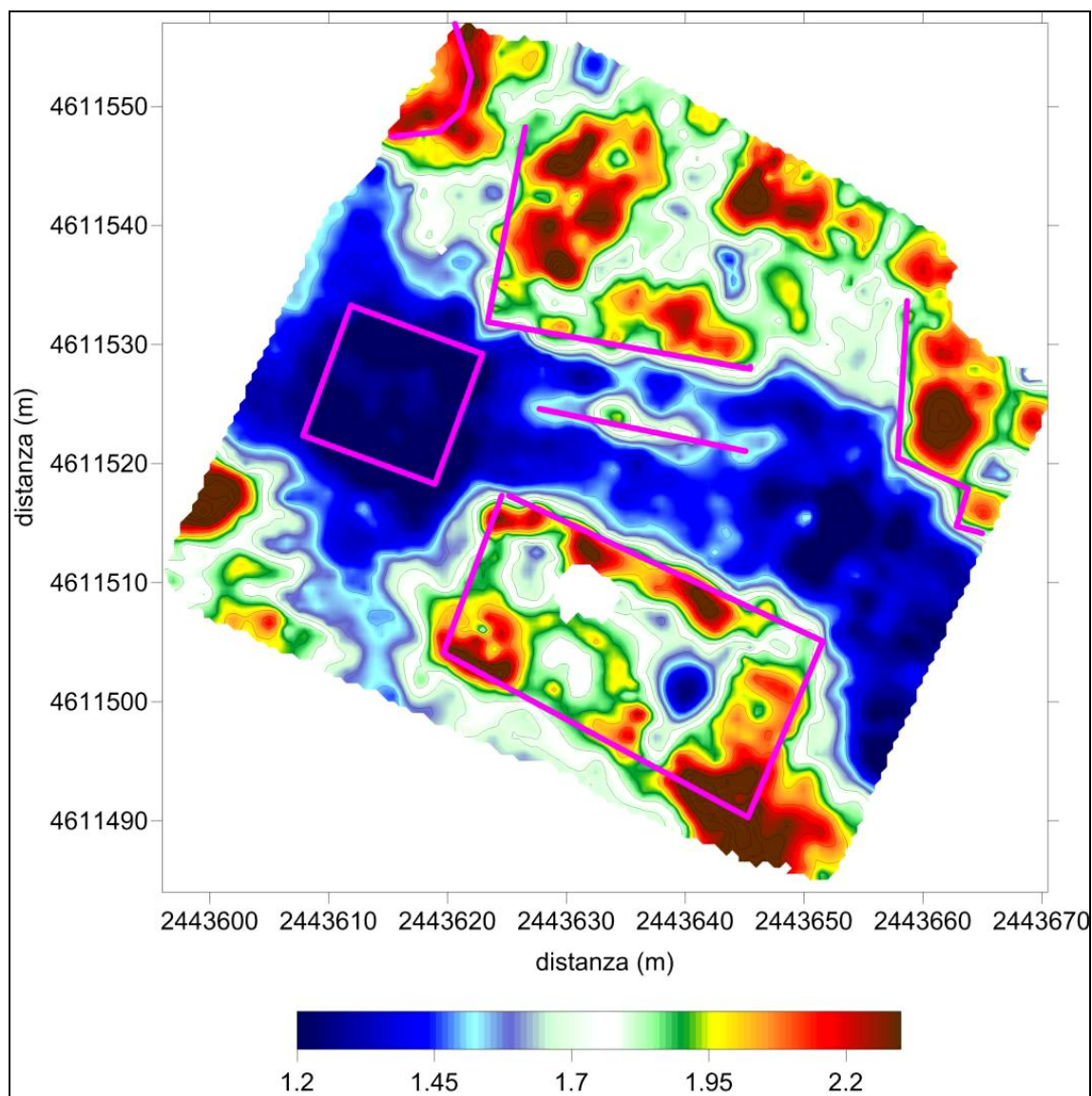


Figura 2.20.- Mappa tomografica con l'interpretazione della anomalie (linee fucsia).

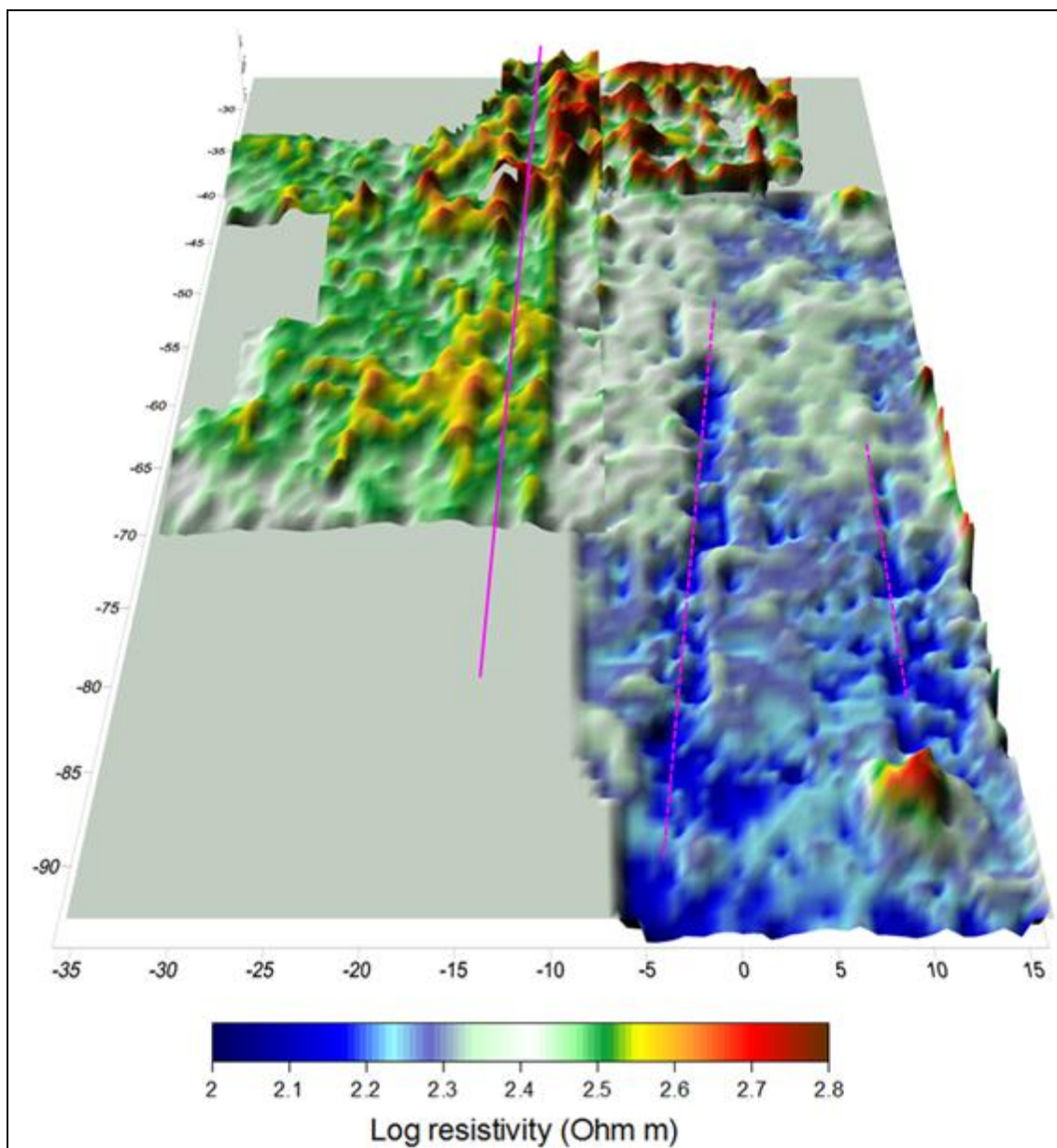


Figura 2.22.- Tomografica 3D con l'interpretazione della anomalie (linee fucsia).

Capitolo 3 – Tecniche digitali di rilievo per la ricerca e documentazione archeologica

3.1 L'INFORMAZIONE ARCHEOLOGICA

In archeologia l'uso di tecniche digitali nel campo del rilevamento è piuttosto recente, soprattutto per tre motivi: il costo del prodotto 3D, la diffusa considerazione che il 3D sia solo un fattore opzionale all'indagine e lo sviluppo di specifiche competenze per la loro corretta applicazione.

Con le progressive innovazioni informatiche ci sono stati enormi passi avanti soprattutto per la possibilità di documentare graficamente, con maggiore precisione rispetto alle tecniche classiche di rilievo diretto, le entità strutturali in oggetto.

In pochi anni molti sono stati i casi studio che hanno visto l'applicazione del laser scanner e della fotogrammetria in campo archeologico⁶⁸ proprio perché, mediante queste tecnologie, lo studioso può avere la possibilità di avere materialmente il suo oggetto nel laboratorio e poterlo analizzare in tutti i suoi aspetti relazionandolo nel suo spazio circostante.

Le continue innovazioni metodologiche applicabili nel campo dei Beni Culturali forniscono una vasta gamma di strumenti che contribuiscono in modo attivo nel rilevamento, nella rappresentazione e visualizzazione dei siti di interesse culturale, nonché nella loro documentazione, restauro, ricostruzione e conservazione. Infatti, la documentazione e l'archiviazione dello stato di un monumento sono fondamentali in caso si verifichi la necessità di interventi di ricostruzione o conservazione, così come la possibilità di rilevare nel dettaglio la forma ed i particolari permette uno studio approfondito delle tecniche costruttive o una rappresentazione tridimensionale porta ad una completa e più intuitiva percezione dello spazio, rendendo questo tipo di documentazione un mezzo prezioso anche nel campo della didattica⁶⁹.

In altre parole, questi strumenti sono in grado di fornire una gran quantità di dati a prescindere dalle finalità disciplinari, poiché i prodotti che se ne ricavano sono utilizzabili per scopi differenti.

Le soluzioni tecnologiche oggi disponibili per la rappresentazione metrica digitale dei siti archeologici (sia per la fase di acquisizione sia per la rappresentazione) sono

⁶⁸ ANGELINI *et alii* 2007; ARRIGHETTI – CAVALIERI 2012; CAVALIERI *et alii* 2009; GIRARDI *et alii* 2015; GIUFFRIDA *et alii* 2015; PANELLA *et alii* 2011.

⁶⁹ PELOSO 2005.

numerose (GPS in modalità statica e cinematica, fotogrammetria aerea e terrestre, rilievi tradizionali con Total Station, laser a scansione terrestre, strumenti che permettono di creare scenari immersivi con cui si può facilitare la lettura del dato rilevato) e si ricorre sempre più alle possibilità offerta da un approccio integrato di tecniche e metodologie diverse, perché ogni strumento e metodologia ha la sua peculiarità e molto spesso solo l'uso integrato di esse consente di avere i migliori risultati, come realizzare un rilievo con una grande quantità di informazioni in modo veloce e rigoroso.

Questo approccio metodologico è dovuto soprattutto al fatto che in ambito dei beni culturali ogni situazione rappresenta un caso a sé stante, con caratteristiche, problematiche e specificità diverse quindi difficilmente riconducibili ad uno standard unico. La possibilità di integrare tali tecniche offrono, infatti, potenti strumenti per l'analisi dei soggetti in studio ed un supporto alle varie attività di ricerca; per esempio per la conservazione e valorizzazione si necessita di una ricca documentazione in termini di forma, colore, geometria e storico-costruttiva, che devono essere contenute in un unico modello ma che possono essere visualizzate anche separatamente in base al tipo di informazione che si cerca.

Per di più, in molte applicazioni la combinazione tra laser scanner e fotogrammetria è la soluzione che porta, al momento, a risultati migliori⁷⁰, poiché le immagini ottenute dalla camera interna del laser scanner hanno una risoluzione ridotta quindi poco utile in campo archeologico, il che richiede l'integrazione con immagini digitali ad alta risoluzione; ricordiamo che proprio in archeologia la risoluzione gioca un ruolo importante, dal momento che uno degli scopi principali è proprio quello di restituire prodotti leggibili per permettere una chiara lettura stratigrafica del sito.

Il presente lavoro vuole mostrare proprio come le nuove tecnologie possano essere impiegate nel campo archeologico, più in generale nei Beni Culturali, per fornire in tempi e costi ridotti informazioni utili a specialisti del settore (restauratori, archeologi, storici, architetti ...).

L'approccio metodologico adottato in questa ricerca riguarda l'integrazione del laser scanner con le procedure fotogrammetriche, al fine di creare un modello 3D dal quale estrarre diversi prodotti come sezioni, piante, ortofoto e modelli interattivi, volti

⁷⁰ GIRANDI *et alii* 2015.

soprattutto alla documentazione e ricostruzione virtuale dell'area delle terme (vedi paragrafo 4.3) con tutte le sue stratigrafie ancora visibili.

Di seguito si riportano, in linea generale, le caratteristiche funzionali e strumentali di entrambe le metodologie adottate; un'analisi dettagliata sulla loro applicabilità al contesto prescelto è riportata nel paragrafo 4.3.

3.2 LASER SCANNER

Oggi queste apparecchiature rappresentano uno dei strumenti più veloci per quanto riguarda il rilevamento della forma dei beni archeologici ed architettonici.

In base al principio operativo e al tipo di oggetto che si deve rilevare esistono tre tipologie di laser scanner⁷¹:

- Triangolazione del segnale: l'emettitore e il ricevitore del raggio laser sono separati da una distanza e angolazione già nota (*base line*), elementi base per effettuare la triangolazione trigonometrica per calcolare la distanza dei singoli punti dell'oggetto: quando la luce del laser colpisce la superficie dell'oggetto, lo scanner è in grado di rilevare l'angolo del raggio di luce di ritorno e quindi può calcolarne la distanza. Dal momento che hanno una distanza focale inferiore al metro risultano adatti a scansionare oggetti a breve distanza. Sono strumenti maneggevoli e permettono di lavorare con qualunque condizione di luce ambientale, ma la bassa risoluzione e l'alto livello di rumore rappresentano gli svantaggi di questa tecnologia.
- Tempo di volo: lo scanner misura quanto tempo impiega il raggio di luce a colpire l'oggetto e ritornare al sensore e quindi la distanza dall'oggetto. Questi strumenti hanno il vantaggio di poter effettuare scansioni su lunghe distanze (quindi adatti per rilevare ponti, gallerie, cave ...), ma hanno lo svantaggio di essere generalmente poco accurati e il livello di risoluzione risulta basso.
- Differenza di fase: il raggio emesso viene modulato da un'onda armonica; la distanza si calcola comparando la differenza di fase tra l'onda trasmessa e quella ricevuta. Questi laser possono coprire distanze minori (vengono impiegati per colpire soggetti di piccole o medie dimensioni, fino a circa 220m), ma risultano più veloci e generano risultati accurati.

⁷¹ SGRENZAROLI – VASSENZA 2007.

Questi strumenti sono capaci di misurare ad altissima velocità la posizione di un numero altissimo di punti (anche nell'ordine delle migliaia) che definiscono la superficie esterna degli oggetti circostanti; il prodotto finale è una “nuvola di punti” visualizzabile in un file grafico tridimensionale; in pratica restituiscono una “fotografia 3D” del mondo reale scomposto in un numero elevato di punti.

Per il rilievo archeologico - architettonico si utilizzano comunemente dei laser scanner distanziometrici.

3.2.1 STRUMENTAZIONE

I moderni laser scanner terrestri rientrano nei sistemi ottici attivi e sono come delle stazioni totali motorizzate ad elevata automazione in grado di acquisire milioni di punti in pochi istanti.

In questo caso per il rilievo è stato impiegato un laser scanner tipo FARO CAM2 FOCUS 3D, posizionato sul treppiede dotato di bolla sferica: esso permette una visualizzazione verticale di 305° e orizzontale di 360° , una portata fino a $330m$, per una acquisizione fino ad un milione di punti al secondo (*Figura 3.1*).



Figura 3.1 - FARO FOCUS 3D.

Tramite il display touchscreen presente sullo strumento è possibile controllare ed impostare le funzioni di scansione.

Per le sue dimensioni molto compatte è risultato maneggevole lo spostamento dello strumento sull'area archeologica durante la fase preparatoria delle scansioni; inoltre la praticità del treppiede, con supporti regolabili, ha consentito di raggiungere con facilità la giusta orizzontalità (messa in bolla) necessaria allo strumento, posizione verificata anche dalla bolla elettronica interna dello strumento stesso.

3.2.2 PRINCIPI E OPERAZIONI SUL CAMPO

Generalmente tutti i laser scanner terrestri funzionano secondo la coppia sorgente-sensore: la sorgente emette un pattern illuminante – fascio di luce laser (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) - scandendo lo spazio in modo regolare ed automatico, restituendo al sensore un segnale di ritorno che ha come contenuto informativo due parametri: la distanza che separa il laser e la superficie investigata e l'intensità del raggio riflesso detto riflettanza. Questi due parametri sono memorizzati in due tabelle, dette matrici, dove gli indici di riga e di colonna sono rappresentati rispettivamente dall'angolo verticale e dall'angolo orizzontale che descrivono la posizione del punto rilevato nello spazio. Quindi oltre al calcolo della distanza vengono descritte la rotazione sul piano orizzontale dello strumento (angolo orizzontale), e la rotazione dello specchio di deflessione del raggio sul piano verticale (angolo verticale). Il sistema così descritto (distanza - angolo orizzontale - angolo verticale) descriverà lo spazio circostante allo strumento in coordinate polari.

La procedura di acquisizione è automatizzata poiché l'operatore si limita a definire l'area da rilevare e la densità dei punti: lo strumento effettua una rotazione intorno al suo asse e misura tutti i punti che ricadono nel suo campo visivo, memorizzandoli secondo il sistema di riferimento interno dello strumento. Principalmente ci si concentra sulla qualità del dato primario, sulla registrazione di scansioni adiacenti, sulla georeferenziazione delle stesse e sulla loro integrazione con immagini provenienti da riprese fotogrammetriche esterne. Per quanto riguarda la risoluzione scelta, essa dipenderà dal prodotto finale che si vuole ottenere; ovviamente la precisione e la risoluzione dipenderanno strettamente dal tipo di strumentazione utilizzata. Questi fattori incideranno sui prodotti finali della nostra indagine come ad esempio profili,

sezioni, ortofoto e piante. Mentre, per i metodi di registrazione e georeferenziazione si hanno a disposizione diverse procedure, generalmente basate su analisi di tipo Procustiano⁷² o che utilizzano punti automaticamente individuabili (*marker*)⁷³.

In genere gli oggetti da rilevare vanno ripresi da più punti di vista, dunque sono necessarie varie scansioni effettuate da stazioni diverse, in modo che le varie nuvole di punti dovranno parzialmente sovrapporsi ed avere così delle zone in comune che andranno successivamente allineate al computer per ottenere un unico modello tridimensionale. Solitamente per l'allineamento (o registrazione) si materializzano le varie stazioni del laser scanner e si rileva la posizione con la stazione totale in modo da riferirle a un comune sistema di coordinate; in questo modo vengono georeferenziate anche le singole nuvole dei punti⁷⁴.

Qualora non sia possibile utilizzare un rilievo topografico da stazione totale, si sceglie una delle stazioni laser come principale e si allineano di conseguenza tutte le altre al sistema di riferimento generato da queste scansioni.

Prima di acquisire le scansioni bisogna effettuare un sopralluogo sul campo, il posizionamento dei *marker* o *target* e la regolazione dei parametri del laser scanner.

Per quanto riguarda il sopralluogo sul campo è necessario compiere un'analisi preliminare della struttura da rilevare, in modo da stabilire quanti e quali saranno i punti di acquisizione al fine del rilievo completo dell'oggetto, cercando di ridurre al minimo i buchi (assenza di dato) e zone nascoste (zone d'ombra). In questa fase è essenziale progettare anche la disposizione dei *marker* o *target* (che da adesso saranno chiamati bersagli). Essi non sono altro che degli oggetti facilmente individuabili all'interno delle scansioni. Questi bersagli a volte hanno un valore di riflettività notevolmente più elevato rispetto agli elementi presenti in natura, e consistono in adesivi catarifrangenti, piastrine riflettenti, dischi geometrici o in sfere bianche; talvolta possono essere usati anche "*marker naturali*", come spigoli o punti singolari, poiché alcuni *software* sono in grado di autocorrelarli ugualmente con il riconoscimento manuale.

Vengono utilizzati in fase di acquisizione delle scansioni per due motivi principali: come segnali per la determinazione di punti topografici per la georeferenziazione del modello, mediante rilievo topografico o con l'utilizzo di stazioni totali. Infatti quando

⁷² Cfr. CROSILLA – BEINAT 2000.

⁷³ BORNAZ *et alii* 2002.

⁷⁴ BIANCHINI 2008.

siamo in presenza di una struttura caratterizzata da superfici complesse (situazione che si presenta nella maggior parte dei casi), sarà necessario effettuare un numero elevato di scansioni; quindi per un maggior controllo degli errori spaziali, è particolarmente indicato l'appoggio di una poligonale chiusa costruita con un rilievo topografico effettuato con una stazione totale, dato che è sempre necessario utilizzare più di una scansione.

Ovviamente la disposizione di questi bersagli viene preventivamente pianificata tenendo in considerazione diversi fattori:

- devono essere perfettamente visibili almeno da due stazioni laser consecutive (tra una scansione e la successiva devono esserci un minimo di tre punti in comune);
- la distanza di presa dai bersagli non deve essere troppo elevata (in fase di elaborazione il *software* potrebbe non riconoscerli e saremo costretti a procedere al riconoscimento manuale);
- la loro disposizione deve essere ragionata in modo che ci sia una certa distanza e distribuzione spaziale tra i bersagli, per ridurre al minimo gli errori di calcolo per il processo di registrazione (rototraslazione delle nuvole); ad esempio è opportuno non metterli sulla stessa linea (*Figura 3.2*).

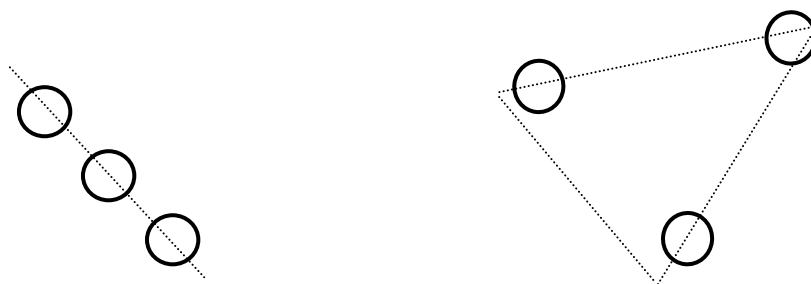


Figura 3.2 – Posizione delle sfere: a destra la disposizione corretta.

Come ultimo procedimento bisogna impostare dei parametri di scansione facilmente regolabili grazie allo schermo touch e interfaccia grafica, tra i quali quelli inerenti alla calibrazione del colore per incorporare nelle scansioni i valori RGB della camera interna, la qualità (numero di scansioni effettuate nel tempo), la risoluzione (rappresenta la distanza minima tra due punti rilevabili e la densità della nuvola di punti), la portata (variazione del passo verticale ed orizzontale), la velocità di scansione (dipende dalla risoluzione) e il campo di scansione (nel nostro caso circa $360^{\circ} \times 320^{\circ}$). Il laser scanner

permette di rilevare, oltre ai valori di riflettività dei materiali (variazione cromatica dei punti acquisiti), anche l'informazione radiometrica di ogni punto. Infatti grazie ad un particolare sensore fotografico si acquisiscono simultaneamente oltre ai dati relativi alla geometria, anche l'informazione cromatica dell'oggetto scansionato, in modo da ottenere nuvole di punti tridimensionali con colori quasi esattamente corrispondenti a quelli reali (ricordiamo che la camera integrata al laser ha una risoluzione ridotta).

3.2.3 TRATTAMENTO DATI

Per il trattamento dei dati sono stati utilizzati due software, uno sviluppato dalla casa costruttrice dello strumento il cui utilizzo è orientato principalmente all'immagazzinamento dei dati del laser al computer, all'applicazione dell'informazione cromatica RGB sulla nuvola di punti, alla individuazione automatica dei bersagli ed alla conseguente registrazione delle nuvole; oltre a questo il *software* consente l'esportazione dei dati per i formati più diffusi; mentre l'altro *software* è utilizzato per l'ottimizzazione degli allineamenti e la produzione delle informazioni necessarie per la lettura archeologica (come piante, sezioni o prospetti).

In dettaglio una volta scaricati i dati, con il programma SCENE della FARO è stato fatto un pre-processamento dei dati grezzi, cioè un primo filtraggio del rumore del dato; successivamente sono stati applicati i valori RGB (informazioni radiometriche) alle singole nuvole di punti. Successivamente con JRC 3D *Reconstructor* sviluppato da Gexcel, i dati tridimensionali sono stati trattati ed integrati come appena detto. Effettuata la visualizzazione e il filtraggio delle nuvole di punti, si effettua un allineamento maggiormente affinato mediante complessi algoritmi matematici che utilizzando il riconoscimento di migliaia di punti in comune riducono l'errore di allineamento a pochi millimetri.

Dopo questa registrazione si procede all'unione in un unico modello di tutte le scansioni, la creazione di superfici e la relativa testurizzazione ed infine l'editing della stessa. Analizziamo nello specifico i vari passaggi già accennati.

3.2.3.1 PRE-PROCESSAMENTO DELLE SCANSIONI

Consiste nel calcolo dei parametri fondamentali per le successive elaborazioni e filtraggio dei dati: attraverso all'impostazione preventiva della distanza del punto

rilevato allo strumento o all'angolo di incidenza del laser sullo stesso, si ottiene il filtraggio automatico della nuvola di punti.

3.2.3.2 REGISTRAZIONE O ALLINEAMENTO DELLE SCANSIONI

Le scansioni vengono allineate in modo da creare la geometria rilevata.

Da quanto detto, grazie all'individuazione di un minimo di tre punti omologhi tra le coppie di scansioni adiacenti, si effettua una rototraslazione di una delle due nuvole di punti sull'altra: quella da rototraslare è definita *mobile*, l'altra di *riferimento*. In questo modo la *mobile* cambia le coordinate che vengono uniformate a quelle del sistema di riferimento della seconda permettendo l'aggancio (*Figura 3.3*). Ricordiamo che le coordinate sono acquisite in base ad un sistema di riferimento interno allo strumento dove l'origine è rappresentato dal centro dello strumento; quindi ogni scansione presenta delle proprie coordinate, per cui bisogna allinearle e registrarle come detto mediante traslazione e rototraslazione.

La collimazione, dunque, avviene in modo automatico sia mediante il riconoscimento del software dei bersagli (ad esempio sfere calibrate o scacchiere), sia in modalità manuale tramite il riconoscimento di bersagli o punti noti (come spigoli, macchie ...). Affinché ciò avvenga in modo univoco bisogna individuare con lo stesso numero/nome il punto omologo individuato nelle due scansioni.

In questa fase possono presentarsi degli errori per cui l'allineamento può risultare errato o impossibile; ciò è dovuto principalmente alla presenza di punti non idonei (disturbi, riflessioni parziali o multiple, insetti, movimenti dei bersagli a causa del vento, vegetazione ...) e comporta una fase di pulizia delle nuvole da effettuare a priori sui dati grezzi (*data clearing*) o immediatamente prima dell'allineamento (*editing*).

3.2.3.3 MESHING

Il processo consiste nella triangolazione del modello tridimensionale, ovvero nella conversione della nuvola di punti in una superficie continua formata da triangoli.

Ciò avviene in diversi step: si individua la porzione di nuvola per la quale si vuole ricostruire la superficie e si isola ed esporta in un formato ideale per la gestione delle superfici; si impostano i parametri di ricostruzione *mesh* e si avvia il processo (*Figura 3.4*). In pratica la *mesh* risulta essere una ricostruzione approssimata della superficie

reale dove il software “sceglie” dei punti scartando degli altri in base a dei parametri impostati dall’operatore.

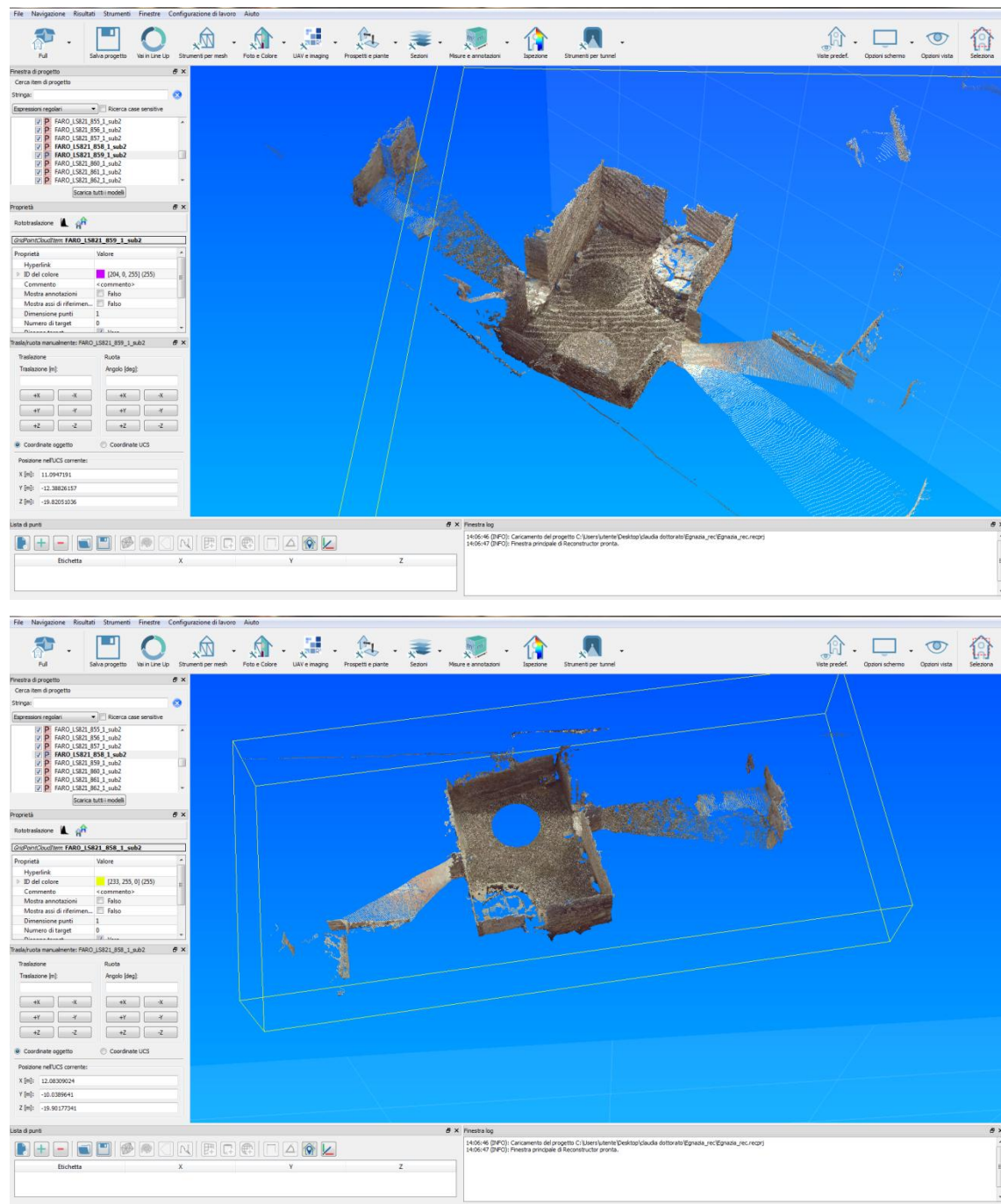


Figura 3.3 - In alto: visualizzazione della proiezione della nuvola di punti di una scansione; in basso: visualizzazione dell’unione di due scansioni dopo il processo di rototraslazione di una nuvola di punti sull’altra.

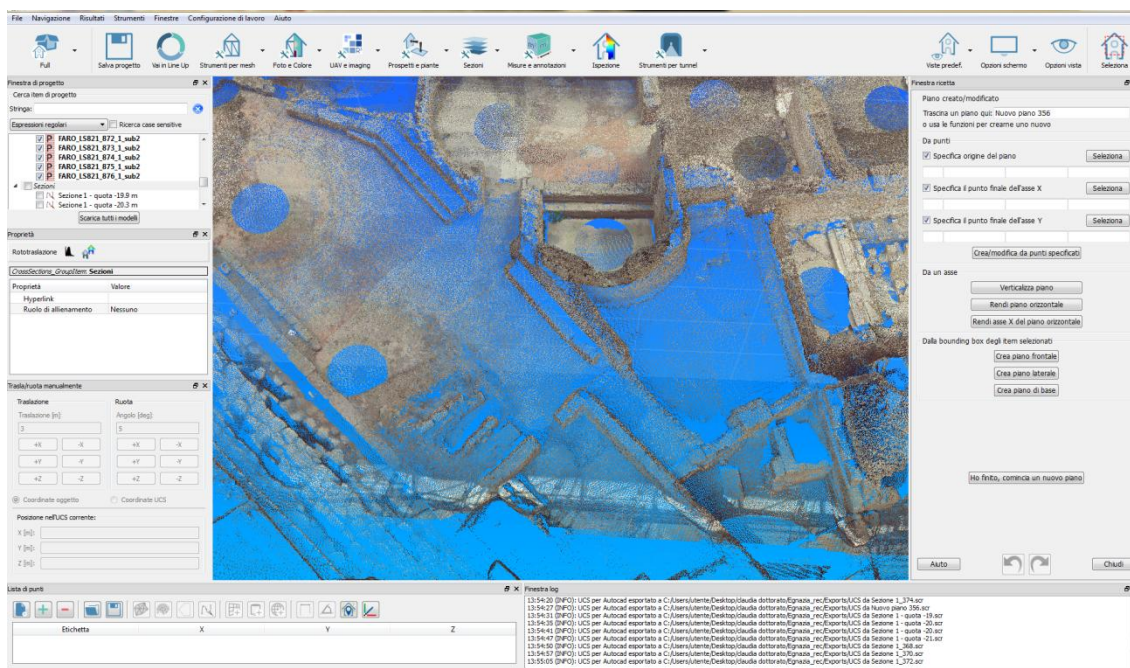


Figura 3.4 - Visualizzazione di un particolare del modello prima del processo di triangolazione.

3.2.3.4 MAPPATURA DELLA TEXTURE

L'obiettivo è quello di dare al modello maggiori dettagli formali e cromatici. Dunque si proiettano sul modello tridimensionale le immagini RGB provenienti dalla fotocamera esterna allo scanner per un maggiore dettaglio.

Per effettuare la proiezione di queste immagini bisogna individuare minimo 11 punti in comune tra fotogramma e modello 3D; in questo modo il programma calcola i parametri di calibrazione della macchina utilizzata (lunghezza focale, centro di proiezione, distorsione), posiziona nello spazio il proiettore virtuale in corrispondenza del punto dove è stata acquisita la foto e proietta l'immagine sulla superficie (Figura 3.5).

3.2.3.5 INTEGRAZIONE CON DATI FOTOGRAMMETRICI

A volte i modelli che si ottengono possono presentare delle lacune a causa dell'eccessiva complessità dell'oggetto, che si presentano come spazi neri o bianchi. Il processo di integrazione consiste nell'importazione di nuove scansioni che vanno a colmare le lacune del modello elaborato, oppure ricorrendo a modelli provenienti da fotogrammetrie che consentono di integrare eventuali lacune provenienti da zone dove è stato impossibile posizionare il laser come ad esempio spazi ristretti o viste da punti in elevato.

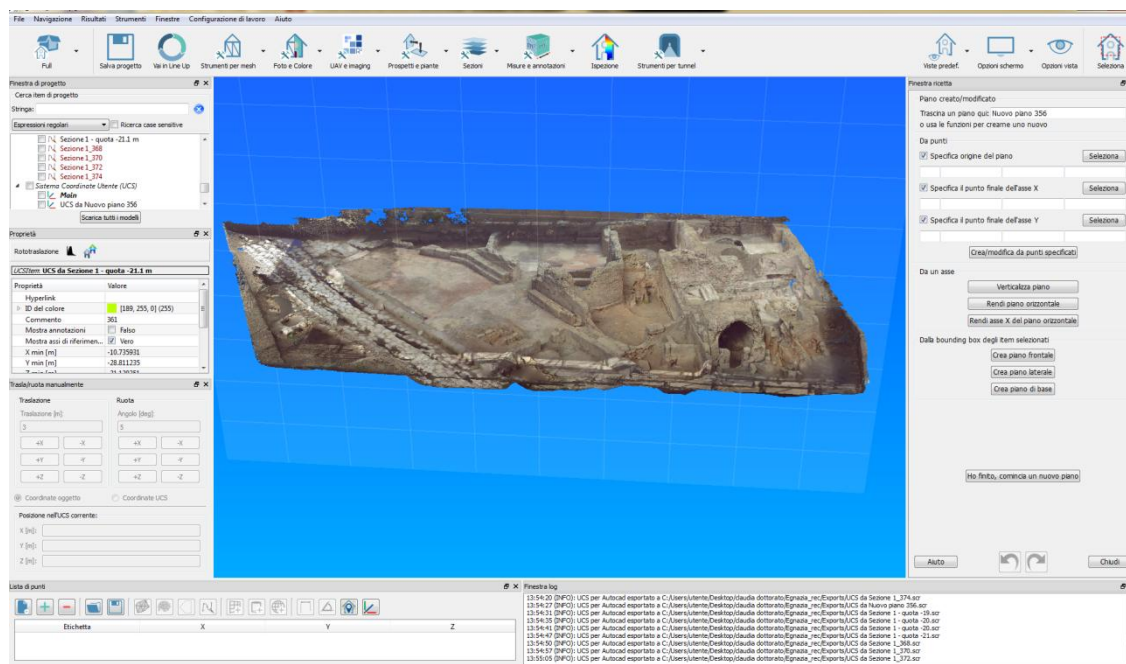


Figura 3.5 - Visualizzazione del modello dopo la creazione della texture.

Il modello così creato risulta essere un modello geometrico tridimensionale dal quale è possibile estrarre informazioni di tipo metrico. Grazie alla possibilità di gestire la visualizzazione del modello è possibile individuare i piani di tagli orizzontali o verticali per ricavare ad esempio le sezioni a differenti quote e/o distanze. Un sistema di estrema praticità e funzionalità, che dà la possibilità di esportare queste informazioni in formati standard (come il *.dxf) per gestirli in CAD. Oltre a questi prodotti, utilizzati nei vari campi di ricerca, in questo lavoro è stato possibile ricavare anche un *Editing video*, un prodotto che può trasmettere in modo più semplice le caratteristiche dell'oggetto indagato, un mezzo virtuale che consente un'esplorazione completa dell'oggetto.

3.3 FOTOGRAMMETRIA STEREOSCOPICA

Con la fotogrammetria, a differenza del laser scanner, l'operatore deve scegliere in prima persona gli oggetti da rilevare, la distanza di ripresa rispetto alla scala di documentazione, la posizione di ripresa e l'orario ottimale di lavoro (il momento in cui l'esposizione della luce è migliore).

In sostanza questo metodo di rilievo indiretto utilizza le immagini fotografiche digitali di un soggetto per generare modelli tridimensionali che permettono di rappresentare con una definizione elevata le superfici visibili, ma anche corrette geometricamente nelle tre

dimensioni, consentendo di migliorare le distorsioni dei fotogrammi e trasformare la visione prospettica dell'oggetto ripreso in una proiezione ortogonale. Due sono i metodi: la fotogrammetria monoscopica, che elabora i singoli fotogrammi da cui si ricava una proiezione ortogonale di tipo bidimensionale (parallela alla superficie inquadrata), e la fotogrammetria stereoscopica che implica invece che il medesimo oggetto sia fotografato da due punti differenti in modo da ricavarne una visione tridimensionale, consentendo di riportarlo all'interno di un sistema geometrico di coordinate spaziali x, y, z e di apprezzare pertanto anche i valori di quota delle sue varie parti, cioè le distanze dall'obiettivo della fotocamera⁷⁵.

Questa acquisizione dei dati metrici e tematici rappresentano uno strumento fondamentale per individuare e misurare le più piccole modificazioni morfologiche delle strutture (in questo caso il complesso termale), e permetteranno una più facile lettura della loro definizione spaziale e formale, talvolta non evidenti con la semplice osservazione. Ciò è possibile poiché la misura delle coordinate legate all'immagine è sostituita dall'identificazione del pixel all'interno della matrice. In altre parole si utilizzano le immagini fotografiche di un oggetto per ricavarne le dimensioni, consentendo di correggere le distorsioni dei fotogrammi e trasformare la visione prospettica dell'oggetto ripreso in una proiezione ortogonale.

Grazie alle sue caratteristiche, oggi la fotogrammetria⁷⁶ è uno degli strumenti maggiormente usati: essa è una tecnica che non richiede il contatto con l'oggetto, è di rapida acquisizione, è molto flessibile e precisa nella determinazione metrica della geometria e della forma di oggetti di ogni tipo.

3.3.1 STRUMENTAZIONE

Fino a qualche anno fa questa tecnica prevedeva il montaggio della camera su un'asta metrica orizzontale collegata ad un cavalletto dotato di controllo tramite bolla sferica posto ortogonalmente alla parete da fotografare. In questo modo la barra permetteva di

⁷⁵ BIANCHINI, 2008.

⁷⁶ PANELLA *et alii* 2011 p. 248: "Il padre fondatore della fotogrammetria è il colonnello francese Aimé Laussedat, che trovò il modo per sostituire le prospettive disegnate a mano con le fotografie e a tale scopo realizzò nel 1858 il primo fototeodolite, composto da una fotocamera abbinata ad un cannocchiale collimatore. Laussedat fu il primo che utilizzò le immagini fotografiche per il rilievo architettonico e per la realizzazione di una mappa topografica della città di Parigi".

mantenere fissa e nota la base e paralleli gli assi ottici. Oggi questa tecnica è superata e non è più necessario agganciare la camera ad una base.

In questo caso, considerato l'articolazione del contesto (vedi paragrafo 4.3), è stata adoperata una CANON EOS 5D MARK II che utilizza una serie di sensori in grado di ricostruire le proprietà geometriche e metriche dell'oggetto.

3.3.2 PRINCIPI E OPERAZIONI SUL CAMPO

Il principio base della fotogrammetria è quello della collinearità che stabilisce come il centro di proiezione della fotocamera, un punto P' sull'immagine e il suo corrispondente punto P nello spazio, devono giacere su una linea retta. Quando molteplici raggi di collinearità vengono intersecati per calcolare le coordinate 3D di un punto identificato in almeno due immagini, si parla di triangolazione fotogrammetrica o *bundle adjustment*⁷⁷. In sostanza si tratta di una tecnica di registrazione che utilizza dei fotogrammi digitali ed un programma di elaborazione fotogrammetrico che genera nuvole di punti RGB, a cui è collegata la texture fotografica tridimensionale⁷⁸. Questo implica che i fotogrammi devono sovrapporsi di almeno il 70%, cioè comprendere una porzione comune dell'oggetto ripreso. Generalmente passo successivo è una battuta di rilievo con la stazione totale per determinare le coordinate spaziali sia nei punti di stazione delle fotocamere, sia di una serie di punti di riferimento (marcature fiduciali, target) situati sull'oggetto ripreso comuni ai vari fotogrammi⁷⁹.

Il modello numerico a nuvola di punti contiene in ogni suo punto le coordinate spaziali x , y e z , e mantiene le caratteristiche colorimetriche del pixel appartenente alle riprese⁸⁰.

Il primo passo nella programmazione di un rilievo è la creazione di un progetto di presa fotografica, ovvero elaborazione un modello operativo di lavoro che tenga conto dei risultati che si vogliono ottenere e dei fattori che possano influire su di essi (dimensioni dell'oggetto, condizioni di luci e ombre, condizioni logistiche dell'area ...).

Operativamente sul campo bisogna seguire una serie di fasi per ottenere una buona registrazione delle strutture. Come prima operazione si effettua un sopralluogo sul campo, al fine di stabilire le linee guida per dei buoni punti di stazione, il

⁷⁷ RUSSO – GUIDI 2011.

⁷⁸ ARRIGHETTI - CAVALIERI 2012.

⁷⁹ CUNDARI 1982.

⁸⁰ PANELLA *et alii* 2011.

posizionamento dei target, per le battute del rilievo topografico e per un efficace acquisizione fotogrammetrica.

I punti di presa fotografica devono essere studiati in modo tale da ottenere un livello di dettaglio formale del modello quanto più elevato possibile. La distanza tra la base di presa (posizione dello strumento) e la distanza dall'oggetto può variare in base all'articolazione delle strutture (posizione e grandezza).

Per il posizionamento dei target si usano delle mire (dischetti di plastica) con disegno a scacchi bianco-nero o elementi in plastilina, distribuite sulla superficie da rilevare a distanza nota, indispensabili per assegnare in fase di georeferenziazione ed elaborazione le dimensioni reali e il corretto orientamento spaziale. Oggi i nuovi software consentono di utilizzare target naturali come spigoli, punti o linee. Il riconoscimento di questi punti omologhi tra i vari fotogrammi, permette di eseguire le operazioni di *pattern recognition*, ossia elaborazioni di riconoscimento automatico di forme⁸¹.

Successivamente i target vengono rilevati tramite rilievo topografico e si procede alle correzioni di possibili errori fotogrammetrici grazie alla fase di calibrazione. Generalmente questa prassi non deve essere effettuata ogni qual volta si inizia un nuovo rilievo, ma periodicamente e riguarda la conoscenza dei parametri di orientamento interno, indicati dal costruttore in appositi documenti, i certificati di calibrazione della camera fotografica. Consiste nel registrare la costante della camera (o lunghezza focale), posizione del punto principale e alcuni parametri addizionali usati per modellare eventuali errori sistematici come, ad esempio, la distorsione della lente. In questo modo si determina la deviazione geometrica fra realtà e il sistema di acquisizione⁸².

Ricordiamo che oggi uno degli aspetti più innovativo della fotogrammetria digitale è proprio quello della forte automazione all'interno delle procedure di acquisizione.

Infine si procede con la ripresa fotogrammetrica (acquisizione dei dati fotografici), punto centrale di ogni lavoro e particolarmente delicato poiché dalle riprese dipende la fase di elaborazione e il prodotto finale. Diversi sono i fattori che influiscono sul progetto di ripresa: l'illuminazione del contesto (deve essere quanto più costante possibile), tipo di materiale (poiché non efficace su materiali trasparenti, riflettenti o

⁸¹ PANELLA *et alii* 2011.

⁸² RUSSO – GUIDI 2011.

brillanti), stato di moto (non idonea su soggetti in movimento), la giusta messa a fuoco e corretta posizione di scatto (per una buona sovrapposizione).

3.3.3 TRATTAMENTO DATI

Questa fase riguarda l'elaborazione dei dati e la restituzione dei prodotti finali.

Per il processo ricostruttivo è stato usato il software russo *Agisoft PhotoScan* che ha permesso l'allineamento dei fotogrammi, la costruzione della geometria e la creazione della texture. In altre parole, il programma partendo da immagini fisse che possono essere di formati diversi (JPEG, TIFF, PNG, BMP ...) crea modelli tridimensionali.

3.3.3.1 ALLINEAMENTO DEI FOTOGRAMMI

Una volta effettuata l'impostazione dei parametri di ricostruzione e di modellazione su base fotogrammetrica, utilizzando la tecnica *SFM* (*Structure From Motion*) si effettua la ricostruzione della geometria della scena tridimensionale e le posizioni della camera nel momento dell'acquisizione. La geometria viene "creata" tramite il riconoscimento degli stessi punti particolari nelle diverse immagini 2D.

3.3.3.2 COSTRUZIONE DELLA GEOMETRIA

Vengono create delle superfici triangolate (*mesh*): maggiore sarà il livello di qualità che si vuole ottenere, maggiore saranno i tempi di elaborazione.

Il software eliminerà automaticamente la distorsione sfruttando i parametri di calibrazione interna ottenuti in fase di allineamento.

3.3.3.3 CREAZIONE DELLA TEXTURE

La tessitura superficiale del modello ad alta definizione è ripresa direttamente dalle fotografie e può essere selezionata la modalità di costruzione (*generic*, *orthophoto*, *single photo*).

Capitolo 4 – Il parco archeologico di Egnazia

Il sito archeologico di Egnazia rappresenta un magnifico esempio di città pluristratificata, che grazie all'assenza di sovrapposizioni moderne consente di verificare la lunga sequenza insediativa. L'antico abitato, situato tra Fasano e Monopoli (*Figura 4.1*), occupa un'area pianeggiante che si innalza leggermente nella piccola penisola compresa tra due insenature (la cosiddetta acropoli), corrispondenti allo sbocco in mare di antichi solchi erosivi, detti "lame"⁸³.



Figura 4.1 - Foto satellitare (da Google Maps) con il particolare del sito.

Esso si connota come un'importante centro a continuità di vita: da villaggio capannicolo fortificato del XVI-XV a.C., divenne prima centro indigeno sul litorale adriatico tra Peucenzia e Messapia, poi *municipium* dopo la guerra sociale e infine sede episcopale

⁸³ DEL MONTE - RANDINO 2014.

già dalla seconda metà del IV sec. d.C.; anche se la “definitiva” destrutturazione degli ultimi edifici che rimasero in vita a seguito di queste trasformazioni è riferibile al periodo di scontro tra Bizantini e Longobardi, le ultime tracce di frequentazione dell’area si hanno nell’XI secolo. La fortuna di tale sequenza storico-insediativa è la sua posizione strategica: Egnazia si connota come importante snodo nella comunicazione terrestre e marittima lungo l’arco adriatico, come ponte commerciale e culturale fra Oriente e Occidente; importante è anche il suo sviluppo a ridosso di un settore urbano nevralgico (infatti è attraversato dalla *via Minucia*, ricalcata poi dalla *via Traiana*)⁸⁴.

4.1 IL SITO: INQUADRAMENTO STORICO-ARCHEOLOGICO

4.1.1 STORIA DELLE INDAGINI ARCHEOLOGICHE

Il sito archeologico di Egnazia ha da sempre suscitato interesse per la sua complessa articolazione storico-insediativa e per le caratteristiche del suo impianto urbano. Un quadro che si è andato a delineare nel corso degli anni grazie al susseguirsi delle scoperte archeologiche.

Purtroppo però il sito è stato spesso soggetto a spoliazioni, come quelle ricordate da Orazio e Strabone, fino al XVI secolo, quando viaggiatori e storici parlano di ruderi affioranti usati per la costruzione delle abitazioni di Monopoli e Fasano; non mancano razze d’oggetti d’oro e monete che si verificano a partire dall’Ottocento e in particolare nel 1846 in seguito ad una terribile carestia⁸⁵.

Bisogna aspettare gli inizi del Novecento per assistere alle prime campagne di scavo, anche se si riferiscono a isolate emergenze monumentali come il rinvenimento nel 1912-1913 della piazza lastricata e porticata (il “foro”), un tratto della *via Traiana*, un quartiere di abitazioni e una basilica paleocristiana⁸⁶.

Nel 1939-1940 furono riprese le attività sull’acropoli che portarono all’individuazione di un insediamento dell’età del Ferro.

Successivamente, nel 1959, fu nuovamente indagata la zona del “foro” e nel 1963 le ricerche si estesero sull’acropoli: è in questo periodo che vennero messi in luce i resti di

⁸⁴ CASSANO 2009; CASSANO 2008-2009.

⁸⁵ DEL MONTE - RANDINO 2014.

⁸⁶ MASTROCINQUE 2007; DEL MONTE - RANDINO 2014.

un tempio su podio di tipo italico, e nell'area monumentale a sud venne scoperto un "sacello dedicato alle divinità orientali" (la Magna Mater Cibele e la dea Siria)⁸⁷.

Alla fine degli anni Sessanta fu individuato un tappeto musivo all'interno della basilica episcopale⁸⁸; da segnalare, sono anche i sondaggi in profondità effettuati nel 1965 per verificare i risultati delle prospezioni condotte sul lastricato della piazza⁸⁹.

Interessanti per la seconda metà del Novecento furono gli scavi del 1967 che portarono alla luce un tratto di cortina e una porta databile al V-IV a.C., oltre all'individuazione delle fondazioni di una torre quadrangolare in corrispondenza della porta nord; tra il 1971-75 si avviarono le indagini della necropoli occidentale⁹⁰.

Da ricordare sono anche gli interventi del 1969-70 di Lattanzi nella basilica episcopale⁹¹ e quelli del 1979 e 1994 di S. Diceglie nell'area del porto con fotografie aeree, ecoscandagli e radar, prospezioni e rilievi⁹².

Attività archeologiche più sistematiche si ebbero tra il 2001 e il 2008, in una superficie di oltre 3500 mq, quando prese avvio il "Progetto Egnazia: dallo scavo alla valorizzazione" nato dalla collaborazione tra il Dipartimento di Scienze dell'Antichità dell'Università degli Studi di Bari, la Soprintendenza per i Beni Archeologici della Puglia e il Comune di Fasano.

Le prime campagne di scavo, effettuate tra il 2001 e il 2003, interessarono l'area della piazza porticata e il quartiere produttivo a sud della *via Traiana*⁹³; tra il 2004 e il 2006, oltre alla ripresa delle indagini nelle aree precedenti, furono oggetto di saggi anche la zona del tempio italico (nell'area dell'acropoli) e l'area della basilica episcopale, in particolare nella navata meridionale⁹⁴; in questi anni vennero indagate anche le fornaci situate nel quartiere residenziale e produttivo.

Nel 2007 fu scoperta una nuova area, quella delle terme⁹⁵; nel 2008 e 2009 le indagini vennero impostate soprattutto nell'area delle terme, al fine di chiarirne la loro sequenza stratigrafica, e nell'area della cosiddetta 'acropoli', sia nella zona del tempio che in alcuni settori esclusi dalle prime ricerche del 1966.

⁸⁷ DEL MONTE - RANDINO 2014.

⁸⁸ CASSANO 2009; cfr. LATTANZI 1970.

⁸⁹ MASTROCINQUE 2007; STAZIO 1965.

⁹⁰ DEL MONTE - RANDINO 2014.

⁹¹ LATTANZI 1972.

⁹² AURIEMMA 2004.

⁹³ CASSANO *et alii* 2007; CASSANO 2009.

⁹⁴ CASSANO 2009.

⁹⁵ CASSANO *et alii* 2007; CASSANO 2008-2009; MASTROCINQUE 2007.

Le indagini condotte tra il 2010 e 2011 oltre a chiarire la cronologia delle terme sulla *via Traiana*, al limite dell'area destinata con ogni probabilità al foro, ampliarono l'area di scavo sita all'esterno del tempio.

Negli anni successivi, dal 2012 al 2015 si procedette ad ampliare progressivamente i saggi di scavo dell'area in prossimità delle terme e dell'acropoli, nonché in un'ampia fascia che definisce il comparto del foro sul lato meridionale.

Grazie a queste scoperte dunque, è stato possibile ricostruire lo sviluppo della sequenza cronologica e funzionale delle stratigrafie della città.

4.1.2 LE FASI INSEDIATIVE

Il primo villaggio protostorico si insedia nel XVI secolo a.C. sulla collinetta dell'acropoli, una piccola penisola protesa sul mare, ed è caratterizzato da una fortificazione che si estende verso l'entroterra realizzata con un doppio paramento di blocchi calcarei irregolari riempito da pietrame e terra; nel XIV secolo a.C. l'insediamento, un villaggio formato da capanne, viene ricostruito a seguito di un vasto incendio⁹⁶.

La presenza di nuclei nella tarda età del bronzo è confermata da battuti argillosi, buche di palo e un piano refrattario di cottura ricavati direttamente nella roccia, individuati sul lastricato della piazza porticata, sull'acropoli e in diverse zone dell'area successivamente interessata dalla città romana⁹⁷.

Nel IX-VIII sec. a.C., proprio l'area che sarà poi occupata dalla piazza porticata subisce una rifunzionalizzazione con la creazione di un vasto piano di calpestio⁹⁸. Per questo periodo, di maggiore frequentazione del sito con nuclei sparsi di abitazioni, è ben documentata la presenza di due necropoli, con tombe di carattere messapico ma con influenze della vicina Peucezia: la necropoli litoranea si distribuisce lungo la costa ai lati dell'acropoli, quella meridionale (inclusa successivamente nel circuito murario ellenistico) a sud dell'area⁹⁹. A questi usi si vanno a sostituire gradualmente elementi appartenenti alla cultura greca dettati dall'influenza della vicina Taranto (V - IV sec. a. C.)¹⁰⁰.

⁹⁶ CASSANO - FIORIELLO 2009; DEL MONTE - RANDINO 2014.

⁹⁷ CASSANO et alii 2007; DEL MONTE - RANDINO 2014.

⁹⁸ MASTROCINQUE 2007.

⁹⁹ FIORIELLO 2007.

¹⁰⁰ DEL MONTE - RANDINO 2014.

Alla fine del VI secolo a.C. è datato l'impianto produttivo sulla costa, pozzi e vasche per il rifornimento di acqua durante le fasi di lavorazione e due fornaci¹⁰¹.

Tra la fine IV - III secolo a.C. risale il primo impianto di tipo urbano con la costruzione delle mura di *Egnathia*, di un fossato e dell'edificio di culto individuato sull'acropoli costituito da una cella all'interno di un recinto murario¹⁰², l'impostazione del sistema di approvvigionamento idrico con la grande cisterna¹⁰³ e la sistemazione monumentale della piazza porticata che va così ad assumere la connotazione di area plateale, quindi ambiente destinato a funzioni di carattere pubblico, con pavimentazione in terra battuta delimitata da bordi lastricati¹⁰⁴. Importante è proprio la fase di fortificazione, che evidenzia l'esigenza di delimitare l'area nuova dal territorio extraurbano e di proteggersi dall'espansione della Lucania e di Roma¹⁰⁵. Essa cinge la città su tre lati (il quarto è verso il mare) e racchiude una superficie di ca. 42 ettari sviluppandosi per una lunghezza di ca. 1680 m: al suo interno l'organizzazione degli spazi ricalca quella delle altre città messapiche salentine, con un tessuto abitativo discontinuo e tracciati stradali non rettilinei, alternati a spazi agricoli, ai pascoli, alle aree di culto e a quelle funerarie¹⁰⁶.

A *Egnathia* il maggior sviluppo urbanistico si ha in pieno III sec. a.C. e indica l'adozione di forme urbane e architettoniche mutate dalla vicina colonia: contestualmente alla deduzione di Brindisi è infatti testimoniata la monumentalizzazione degli spazi pubblici, come la costruzione sull'acropoli del tempio italico e lo sviluppo di un'area dotata di portici che incorniciano un edificio di tipo teatrale. Tutto ciò si accentua con l'assunzione della condizione di *municipia* dopo la fine della guerra sociale nel 89 a.C. (nel I sec. a.C. la Puglia era totalmente romanizzata, ed alcune città divennero *coloniae* mentre altre *municipia*¹⁰⁷), e quindi alla necessità di una sistemazione di centri amministrativi adeguati alle nuove esigenze¹⁰⁸.

¹⁰¹ CASSANO - FIORIELLO 2009.

¹⁰² CASSANO *et alii* 2007; VALCHERA 2014.

¹⁰³ CASSANO *et alii* 2007.

¹⁰⁴ MASTROCINQUE 2007; CASSANO 2009.

¹⁰⁵ CASSANO - FIORIELLO 2009.

¹⁰⁶ DEL MONTE - RANDINO 2014.

¹⁰⁷ DEL MONTE - RANDINO 2014.

¹⁰⁸ MORCIANO 2014.

Segni di cambiamento interessano la basilica civile, il foro¹⁰⁹ e la valorizzazione dello scalo portuale (a partire da Agrippa)¹¹⁰ con le insenature che vengono attrezzate per l'ancoraggio e la creazione di due moli¹¹¹. Proprio il porto rivestì notevole importanza sia dal punto di vista commerciale che militare, in quanto in particolari momenti sostituì quello di Brindisi; esso costituiva uno scalo essenziale nella rotta di collegamento con *Dyrrachium* da cui aveva inizio la *via Egnatia*: questa, attraversando l'Illiria e la Macedonia, costituiva la via migliore per gli spostamenti delle truppe via terra fino a Tessalonica e Bisanzio¹¹². Probabilmente in relazione all'accresciuta importanza dello scalo marittimo è anche l'edificazione del cosiddetto “criptoportico”, un grande portico sotterraneo localizzato al di fuori dell'area pubblica, usato come deposito e stoccaggio di derrate e sormontato da un imponente edificio pubblico¹¹³.

In tarda età repubblicana e la prima età imperiale (II secolo a.C. – I secolo d.C.) si verifica un'organizzazione più sistematica, a partire dalla rete stradale e in particolare dalla *via Minucia*¹¹⁴, che permette una suddivisione più definita dei quartieri abitativi e delle zone pubbliche¹¹⁵. A sud della direttrice principale si vanno a concentrare le aree residenziali, divisi in isolati da strade minori¹¹⁶.

Le nuove *insulae* comprendono così abitazioni, strutture artigianali e commerciali (fornace e *fullonica*)¹¹⁷: per l'area del quartiere produttivo a S della *via Traiana* si hanno ambienti che costituiscono un unico grande vano rettangolare adoperati a scopo artigianale (in particolare alla lavorazione dei metalli)¹¹⁸. Si assiste quindi alla divisione funzionale degli spazi, che permette una frequentazione fino ai primi del II sec. d.C.¹¹⁹.

Anche le aree sepolcrali subiscono delle trasformazioni, con l'ampliamento delle necropoli già esistenti e la creazione della necropoli occidentale che si estende subito all'esterno delle mura¹²⁰.

¹⁰⁹ DEL MONTE - RANDINO 2014.

¹¹⁰ CASSANO *et alii* 2007; DEL MONTE - RANDINO 2014.

¹¹¹ CASSANO - FIORIELLO 2009.

¹¹² AGRIMI – ALFONSO 2014.

¹¹³ CASSANO - FIORIELLO 2009; DEL MONTE - RANDINO 2014.

¹¹⁴ CASSANO - FIORIELLO 2009.

¹¹⁵ DEL MONTE - RANDINO 2014.

¹¹⁶ MASTROCINQUE 2014.

¹¹⁷ DEL MONTE - RANDINO 2014.

¹¹⁸ MANGIATORDI 2007.

¹¹⁹ CASSANO *et alii* 2007; MASTROCINQUE 2007.

¹²⁰ CASSANO - FIORIELLO 2009.

In età augustea, il piano urbanistico prevede anche l'organizzazione del nucleo monumentale del foro sul cui lato meridionale sono costruite le terme pubbliche¹²¹.

In particolare, nel I sec. d.C. si ha, per l'area plateale, un potenziamento del sistema monumentale e il rinnovo del battuto con la sovrapposizione di un nuovo lastricato al precedente¹²².

Tra il 108 e il 110 d.C. Traiano promuove un programma di monumentalizzazione: la piazza viene lastricata e dotata di un porticato con canalette per la raccolta dell'acqua¹²³; l'arteria principale, che prenderà il nome dall'imperatore e riprende il più antico percorso viario identificato con la *via Minucia*, è riorganizzata in modo da rialzarla e rivestirla con una nuova pavimentazione¹²⁴; contemporaneamente viene pavimentato nuovamente un asse secondario connesso all'arteria principale¹²⁵.

Anche nel settore che sarà poi basilicale si ha la stesura di un interro al di sopra delle evidenze messapiche, a scopo di una rinnovazione funzionale corrispondente ad un uso artigianale e forse anche residenziale¹²⁶.

Sugli anni finali del IV secolo d.C. la città subisce un periodo di cesura dell'assetto insediativo in seguito alla distruzione di numerosi settori determinata da eventi traumatici di origine naturale (sisma con maremoto del 365 d.C.)¹²⁷.

La rapida ripresa si concentra tra gli ultimi anni del IV e i primi del V secolo¹²⁸, favorendo principalmente lo sviluppo degli impianti artigianale e commerciali, il potenziamento monumentale degli edifici cristiani, la promozione di attività economiche e di scambi commerciali e interventi architettonici¹²⁹. In particolare, nell'area interna ed esterna al porticato della piazza furono realizzati piccoli ambienti connessi alle attività svolte nel vicino porto e destinati allo stoccaggio e commercializzazione delle merci e alla distribuzione di prodotti locali e di provenienza africana e orientale¹³⁰, il santuario sull'acropoli viene riorganizzato a scopo

¹²¹ DEL MONTE - RANDINO 2014.

¹²² MASTROCINQUE 2007.

¹²³ CASSANO *et alii* 2007.

¹²⁴ CASSANO - FIORIELLO 2009.

¹²⁵ MANGIATORDI 2007.

¹²⁶ FIORIELLO 2007.

¹²⁷ CASSANO - FIORIELLO 2009; CASSANO 2010.

¹²⁸ MASTROCINQUE 2014.

¹²⁹ CASSANO - FIORIELLO 2009; DEL MONTE - RANDINO 2014.

¹³⁰ CASSANO *et alii* 2007; MASTROCINQUE 2007; DEL MONTE - RANDINO 2014.

produttivo¹³¹, il quartiere a S della *via Traiana* subisce profonde trasformazioni e probabilmente venne anche sfruttato come ricovero per animali oltre che per lo stoccaggio e immagazzinamento di derrate¹³². Inoltre, in prossimità del centro cittadino gli assi stradali subiscono una riduzione e occupazione dovuta alla costruzione di nuovi edifici¹³³. Contemporaneamente a questa fase si ha la defunzionalizzazione e destrutturazione delle terme del foro, ora usate come impianto produttivo di materiali per l'edilizia¹³⁴.

Per gli ultimi anni del IV e gli inizi del V sec. d.C., a seguito della diffusione del Cristianesimo a Roma che investì anche la Puglia, è attestata una prima fase costruttiva della basilica episcopale (sui resti delle strutture ad uso artigianale) con la divisione degli spazi interni¹³⁵.

Alla fine del V secolo la basilica conosce una seconda fase costruttiva che vede l'ampliamento con una nuova abside; anche il comparto plateale viene risistemato con un nuovo battuto che consente il collegamento diretto con la *via Traiana* a garanzia della persistenza delle attività pubbliche di carattere commerciale¹³⁶.

Tra la fine del VI secolo e i primi del VII d.C. anche la basilica paleocristiana, situata nella parte meridionale, viene ampliata verso est e il pavimento viene sostituito con un piano mosaicato¹³⁷: tali modifiche suggeriscono l'abbandono di alcune arterie stradali minori¹³⁸. Da sottolineare che le trasformazioni subite dalla città in questo arco cronologico, è strettamente legata a cambiamenti politico-istituzionali dovute all'affermazione graduale del potere vescovile¹³⁹; infatti a guidare la comunità cristiana nei primi anni del VI secolo vi è un vescovo di nome *Rufentius Egnatinus*¹⁴⁰. Sempre per il VI-VII d.C., è attestato un incremento dell'attività produttiva grazie alle tre calcare (una a sud della basilica episcopale¹⁴¹ e due negli ambienti dismessi delle terme) e al riutilizzo del quartiere residenziale di età imperiale a sud della *via Traiana* per

¹³¹ CASSANO - FIORIELLO 2009; DEL MONTE - RANDINO 2014.

¹³² MANGIATORDI 2007; DEL MONTE - RANDINO 2014.

¹³³ GIULIANI 2010; DEL MONTE - RANDINO 2014.

¹³⁴ CASSANO 2007-2008; DEL MONTE - RANDINO 2014.

¹³⁵ FIORIELLO 2007; MASTROCINQUE 2014; CASSANO - FIORIELLO 2009; DEL MONTE - RANDINO 2014.

¹³⁶ MASTROCINQUE 2007.

¹³⁷ CASSANO *et alii* 2007; FIORIELLO 2007; CASSANO - FIORIELLO 2009.

¹³⁸ DEL MONTE - RANDINO 2014.

¹³⁹ CASSANO 2010.

¹⁴⁰ DEL MONTE - RANDINO 2014.

¹⁴¹ CASSANO 2009.

attività artigianali e ricovero degli animali¹⁴². Nonostante queste riorganizzazioni funzionali degli spazi, da questo periodo inizia il definitivo declino della città.

Infatti già per il VII secolo non si hanno più testimonianze della diocesi egnatina e probabilmente la città fu travolta anche dalla guerra Greco-Gotica (535-553); la completa distruzione della città e il suo abbandono definitivo sono legati però all'arrivo dei Longobardi. Infatti la città di Egnazia viene abbandonata e i pochi abitanti superstiti si rinchiudono sulla collinetta dell'acropoli; qui danno vita a un vero e proprio piano di fortificazione che prevede la realizzazione del circuito murario bizantino e del *castrum* con il reimpiego del materiale del santuario destrutturato¹⁴³.

4.2 LE PROSPEZIONI GEOELETTRICHE

Le operazioni di acquisizione del dato geofisico si sono svolte durante il I e il II anno di dottorato. Le aree oggetto di studio sono state scelte in collaborazione con il gruppo di archeologi dell'Università di Bari impegnati sul campo; dunque in base alle loro esigenze di ricerca e per programmare interventi mirati di scavo, sono state indagate delle precise aree individuate sia all'interno che all'esterne del sito archeologico.

Durante il primo anno, maggiore attenzione è stata rivolta allo studio del metodo della tomografia geoelettrica di cui sono state testate le strumentazioni in alcune zone all'interno della città di Egnazia programmandole a seconda dell'obiettivo che si voleva raggiungere e del contesto geo-litologico di applicazione. Principalmente, però, lo studio è stato rivolto agli elementi fondamentali delle metodologie di elaborazione del dato geofisico. E' importante sottolineare che la riuscita dell'applicazione delle indagini geofisiche in contesti archeologici dipende in primo luogo dalla programmazione dell'intervento, dalla scelta del più adeguato dispositivo di misura in relazione alla sensibilità e alla risoluzione richiesta.

I primi test, svolti in un'area campione adiacente le terme di circa 80m x 30m (*Figura 4.2*), sono stati condotti applicando il metodo geoelettrico in corrente continua (A3000-E) e alternata (ADD-01) (per la descrizione della strumentazione vedere Cap. 2). Per ognuna sono stati variati i parametri di setup, le procedure di elaborazione e di correlazione delle anomalie, modalità di inversione e di rappresentazione dei risultati. In questo modo è stato possibile individuare la strumentazione più idonea per il mio

¹⁴² CASSANO *et alii* 2010.

¹⁴³ DEL MONTE - RANDINO 2014.

contesto: l'ADD-01 è stata utilizzata in tutte le aree indagate ad eccezione dell'area 5 e parte dell'area 1 per le quali è stata ritenuta più idonea la macchina A-3000E.



Figura 4.2 – A sinistra planimetria del parco archeologico con indicazione dell'area dove sono stati svolti i primi test; a destra particolare dell'area.

In una seconda fase sono state testate le tre differenti configurazioni (Wenner, polo-dipolo, dipolo-dipolo) e analizzato i risultati ottenibili, in modo da stabilire quale fosse la strategia migliore da perseguire nelle fasi di lavoro successive (Figura 4.3).

Considerando la logistica dell'area, la profondità delle strutture archeologiche (comprese nei primi 1,5m) e la risoluzione ottenuta dai test, si è appurato che la migliore configurazione da utilizzare è la dipolo-dipolo, in quanto particolarmente adatta per indagare corpi sepolti poco profondi poiché particolarmente sensibile alle variazioni laterali di corpi che si sviluppano verticalmente nel sottosuolo. Constatato ciò, sono state avviate le acquisizioni dei nostri dati effettuando profili paralleli (strisciate) preparati su una griglia densa con lo scopo di ottenere un'elevata risoluzione; la geometria del perimetro dell'areale di ricerca è stato variato di volta in volta in modo da adattare i profili alla zona inquadrata e le distanze interelettrodiche sono state stabilite a priori in base alla configurazione logistica dell'area.

Inoltre per ogni area è stato approfondito lo studio tomografico inerente alle strutture intercettate, creando una serie di tagli verticali ed orizzontali con viste 2D e 3D del

volume del sottosuolo investigato, per cercare di capire l'effettiva estensione e profondità delle anomalie.

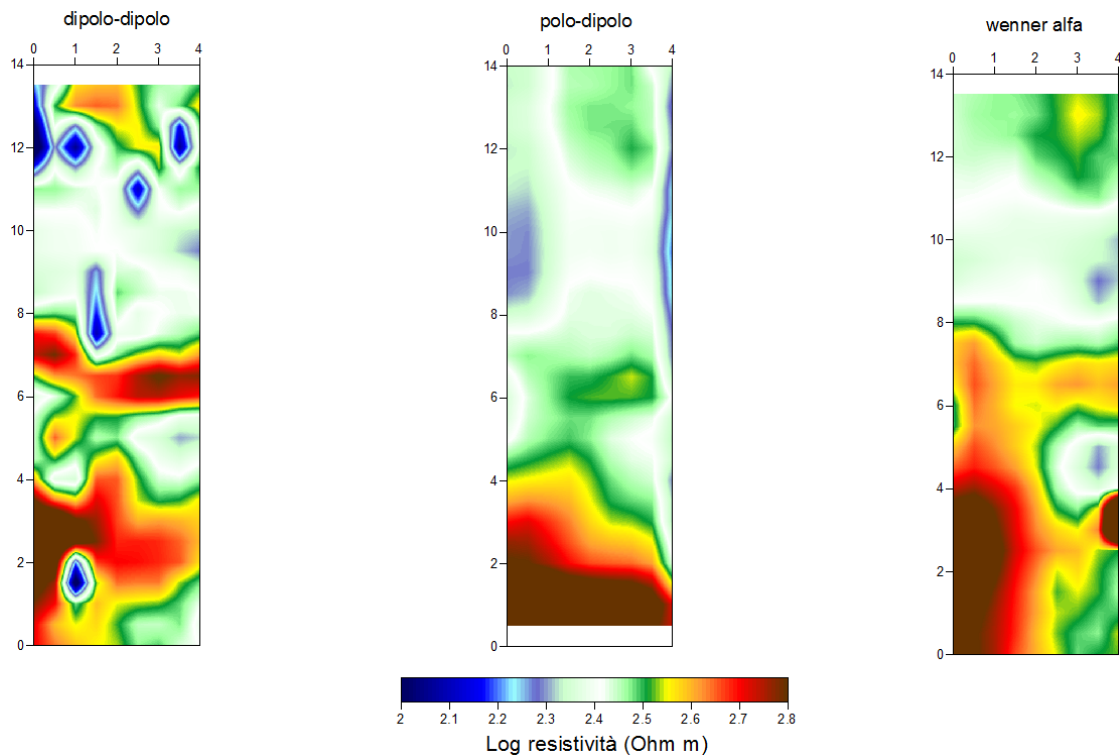


Figura 4.3 – Confronto tra i risultati delle diverse configurazioni (le distanze sono espresse in m).

A titolo di esempio si riporta solo una parte del primo areale indagato, posizionato a sud-ovest dello scavo, all'interno del quale sono stati acquisiti 24 profili (Figura 4.4).

I dati di resistività apparente relativi alle pseudo-sezioni sono stati prima elaborati con un programma di tomografia 3D di probabilità (vedi Cap. 2) (Figura 4.5–4.6–4.7–4.8). Tale elaborazione fornisce come risultato finale sezioni reali, per mezzo delle quali è possibile effettuare una valutazione degli spessori e delle forme dei terreni investigati, con la definizione 3D delle geometrie delle anomalie in essi presenti. Per una più facile interpretazione la scala cromatica è stata modificata per evidenziare meglio le anomalie; pertanto i valori più bassi saranno rappresentati con il verde e non con il blu.

Successivamente le *slice* sono state inglobate in uno spazio volumetrico in modo da mostrare la stessa vista prospettica del volume indagato (Figura 4.9) che ha permesso di rappresentare lo sviluppo delle geometrie delle anomalie in una serie di sezioni verticali ed orizzontali (Figure 4.10–4.11).

In *Figura 4.12* sono riportate le mappe orizzontali dei modelli di resistività ricavate a profondità crescenti. Si può notare come la mappa più esaustiva sia quella relativa a 1m di profondità, la quale suggerisce la presenza di una struttura quadrata di circa 10m x 10m, allineata rispetto alle rovine visibili e in armonia con le stesse; a partire da -1.5m le *slice* mostrano come le strutture siano sempre meno intercettate fino a scomparire del tutto alla profondità di 3m. Per rendere più chiaro quanto detto, le stesse *slice* sono state posizionate in colonna con vista 3D (*Figura 4.13*).

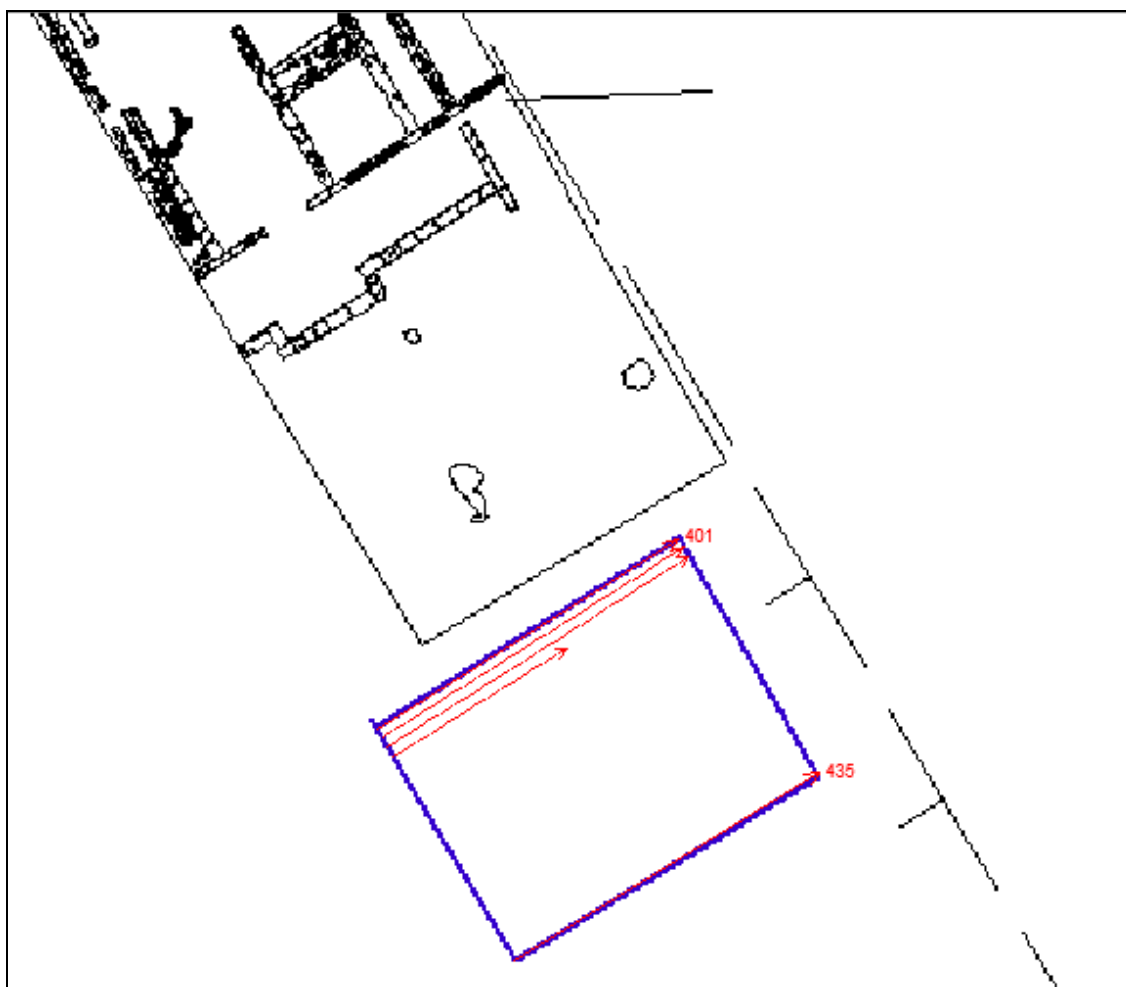


Figura 4.4 – Schema di acquisizione dei profili dell'areale usato come esempio di studio tomografico; la numerazione dei profili non è continua per una questione operativa sul campo.

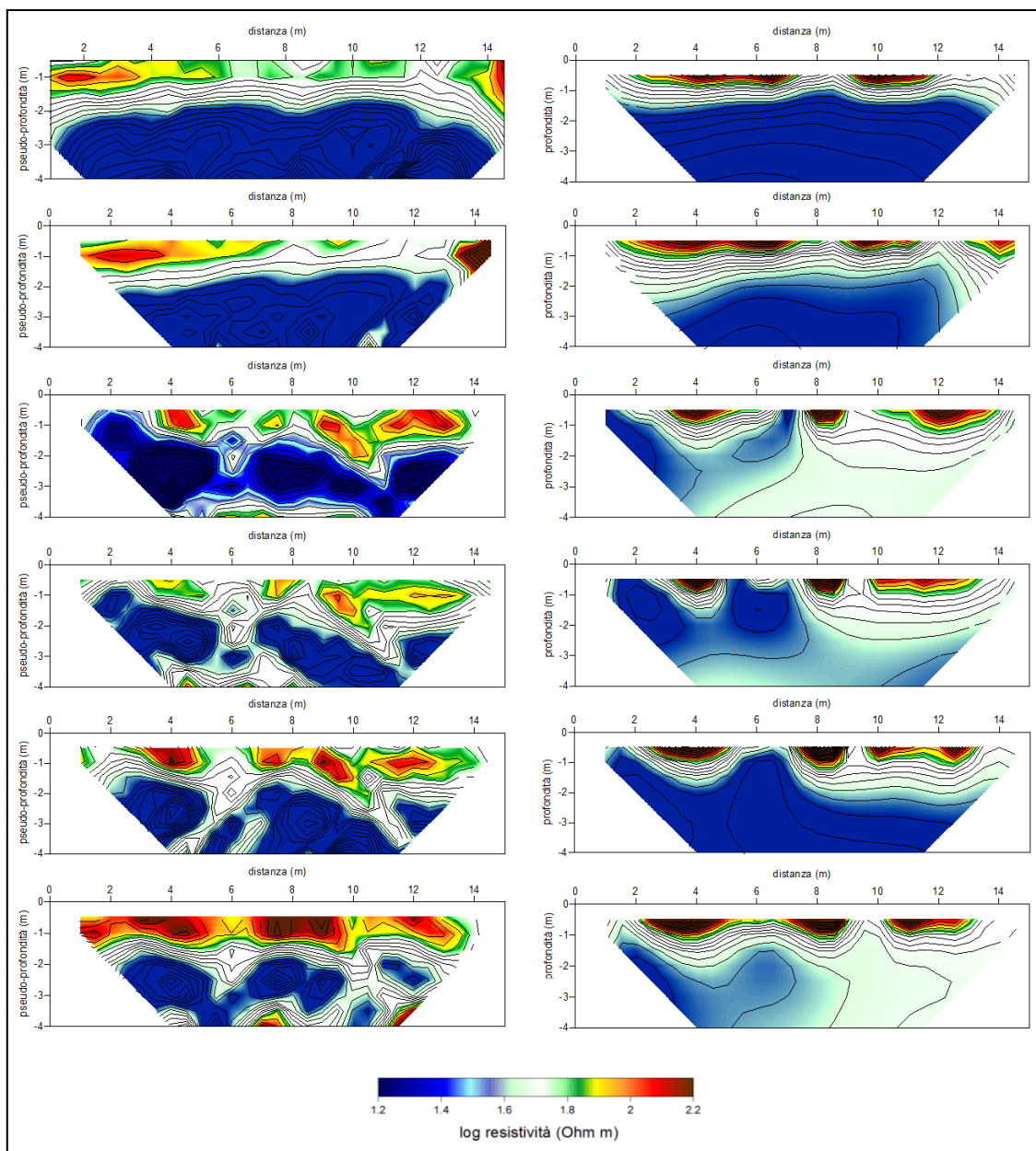


Figura 4.5 – Pseudosezione di resistività apparente (sinistra) e l'inversione di probabilità (destra); dall'alto profilo 401, 402, 404, 405, 407, 408.

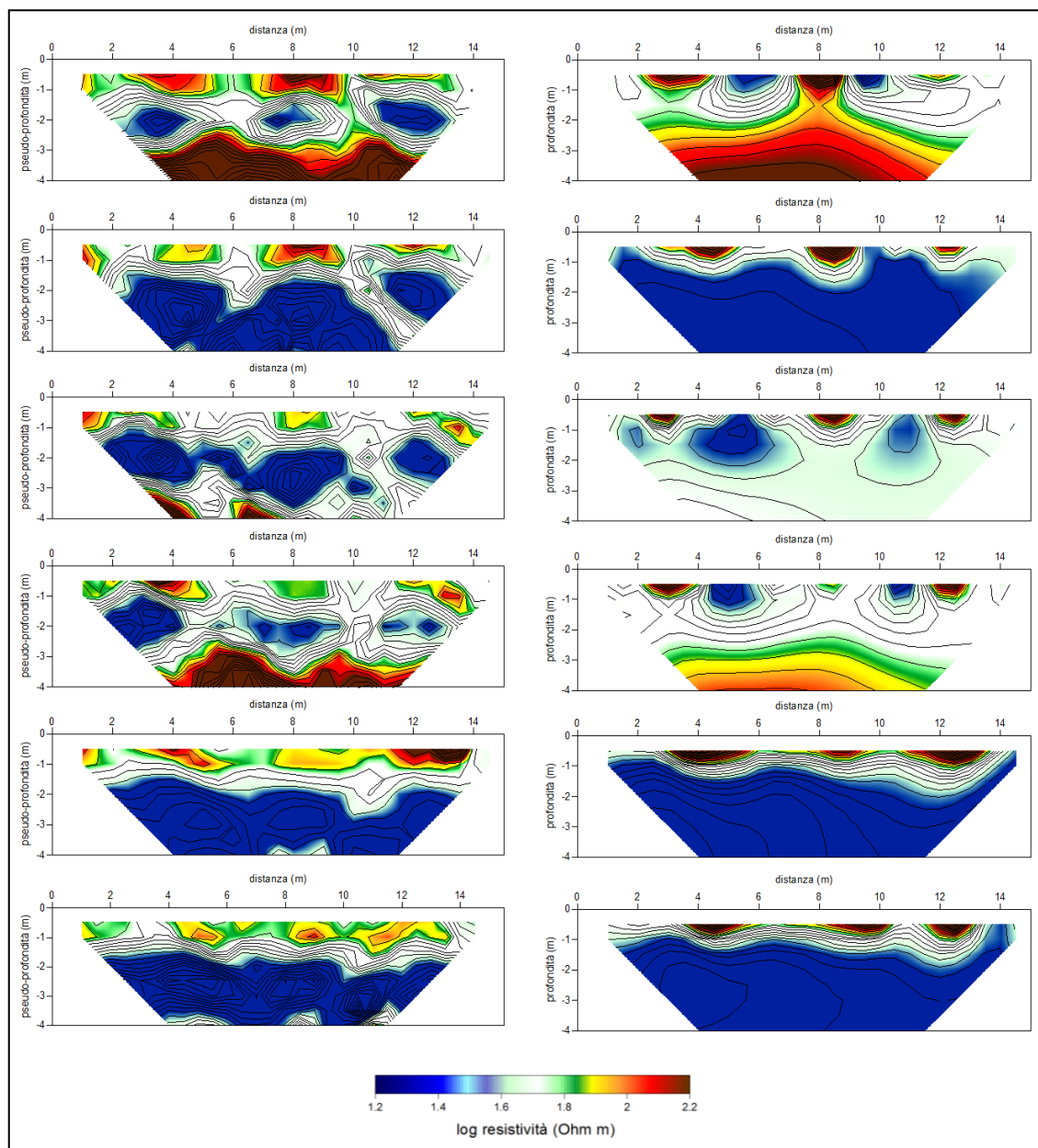


Figura 4.6 – Pseudosezione di resistività apparente (sinistra) e l'inversione di probabilità (destra); dall'alto profilo 410, 411, 413, 414, 416, 417.

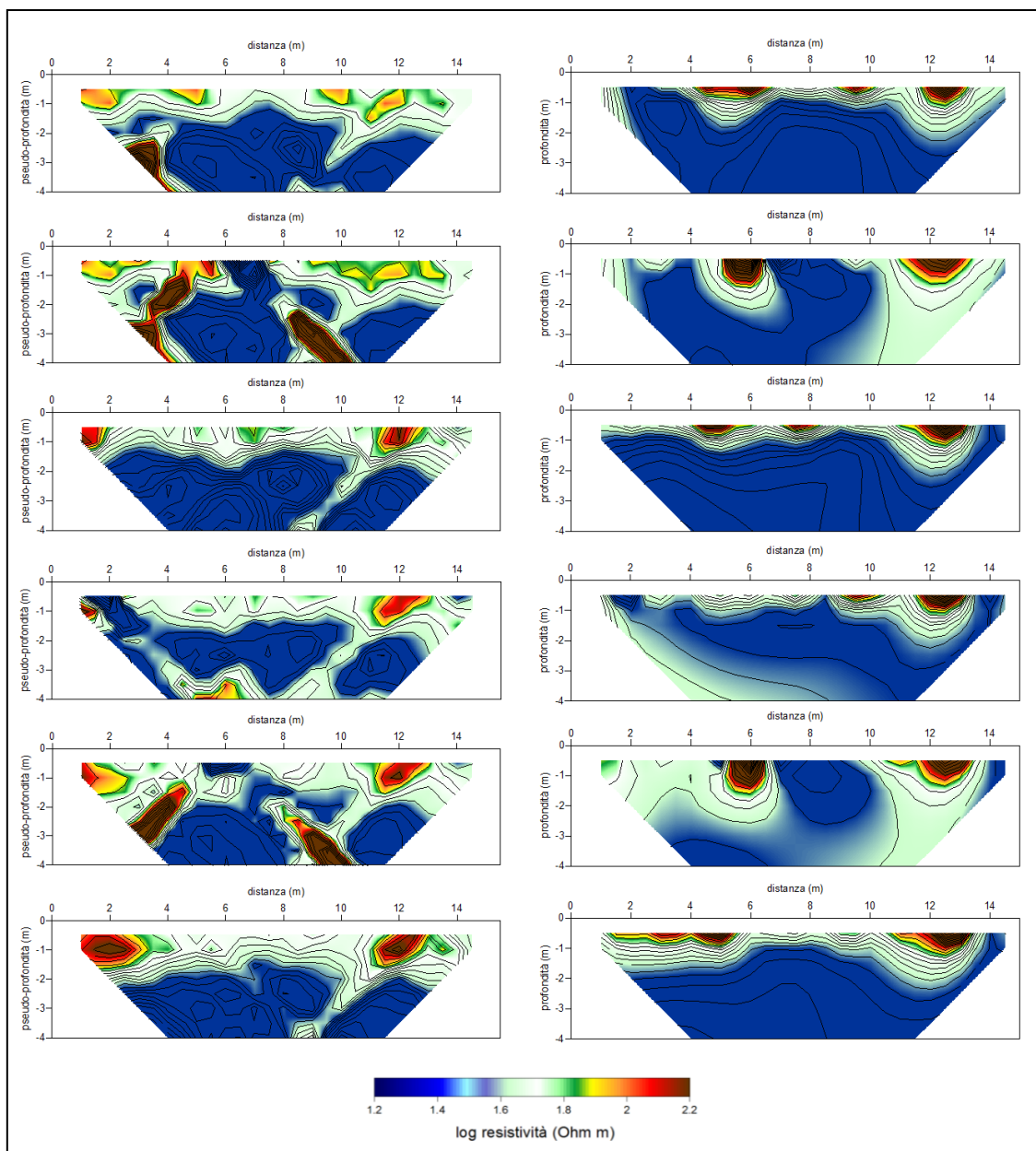


Figura 4.7 – Pseudosezione di resistività apparente (sinistra) e l'inversione di probabilità (destra); dall'alto profilo 419, 420, 422, 423, 425, 426.

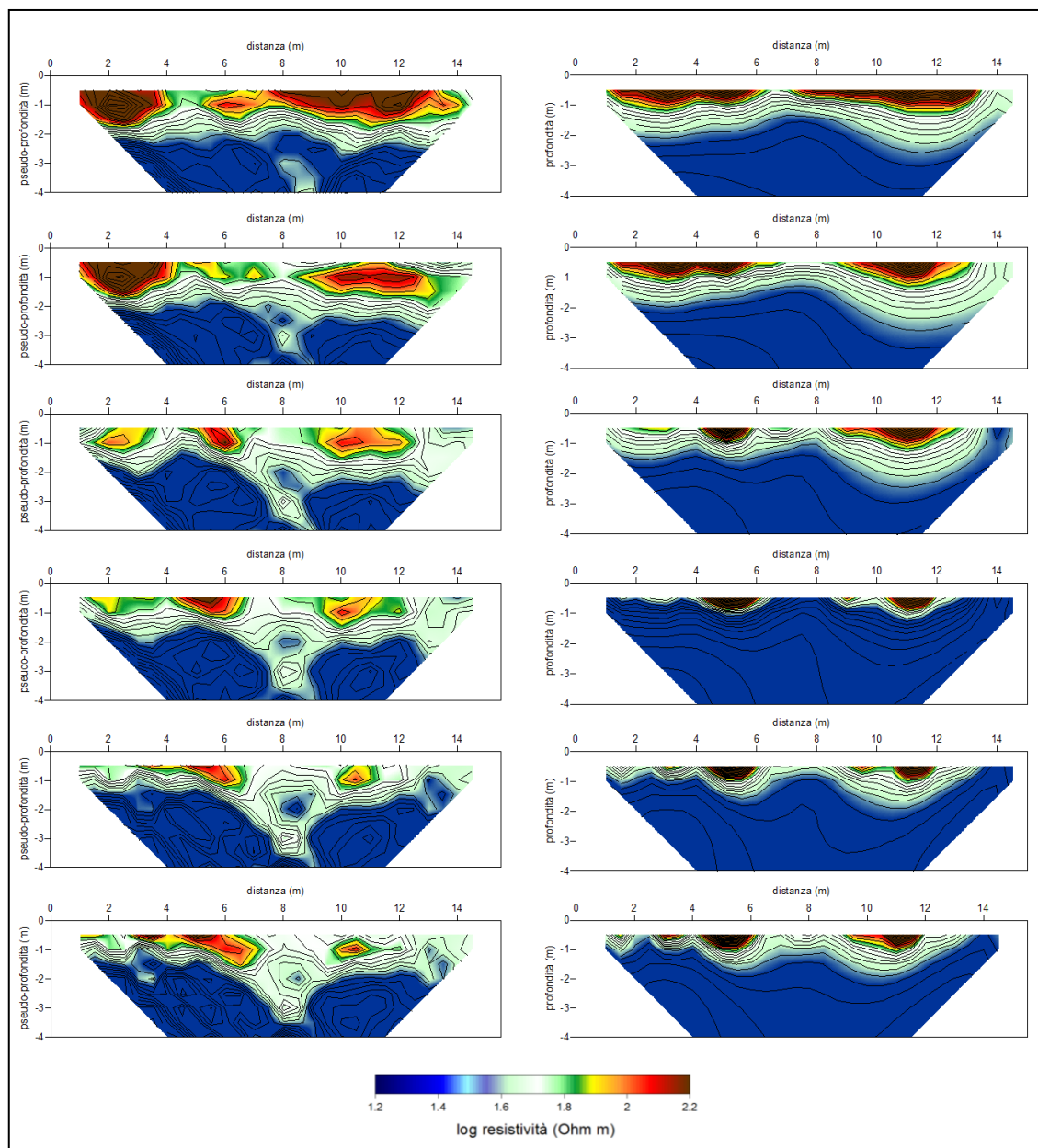


Figura 4.8 – Pseudosezione di resistività apparente (sinistra) e l'inversione di probabilità (destra); dall'alto profilo 428, 429, 431, 432, 434, 435.

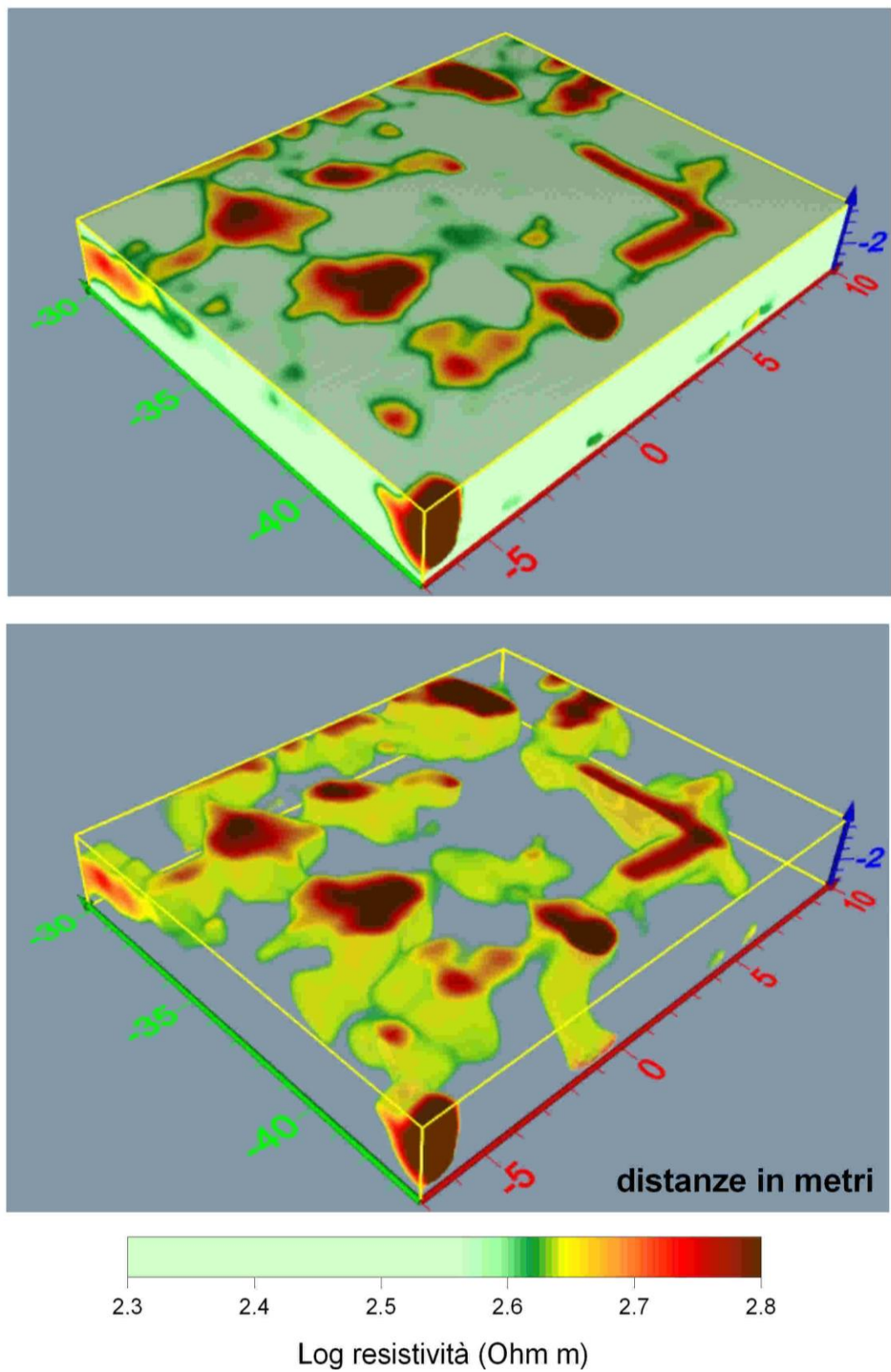


Figura 4.9 – In alto la vista 3D del volume tomografico di probabilità; in basso la visualizzazione delle sole anomalie significative.

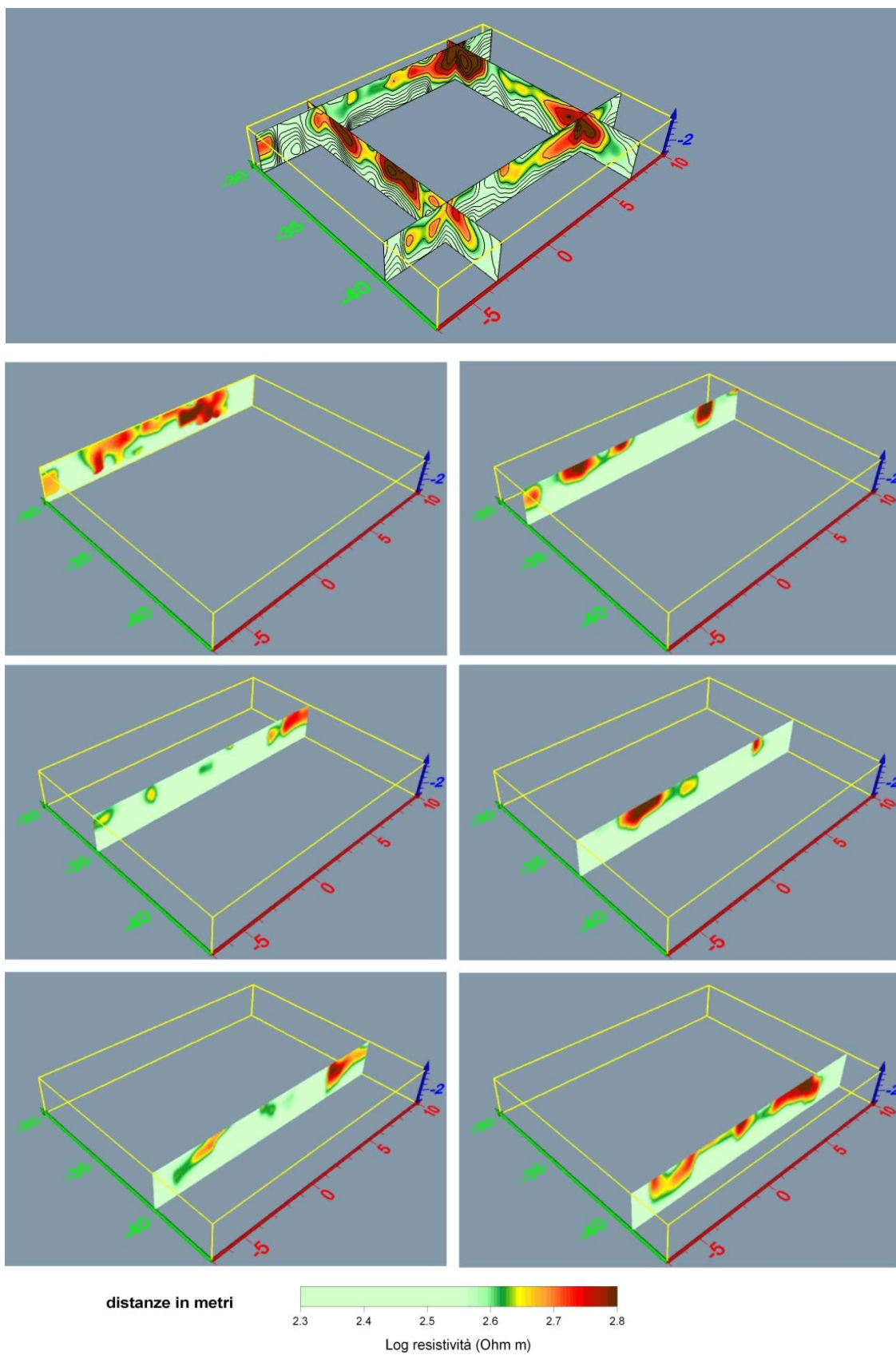


Figura 4.10 – Tomografia di resistività: sezioni verticali.

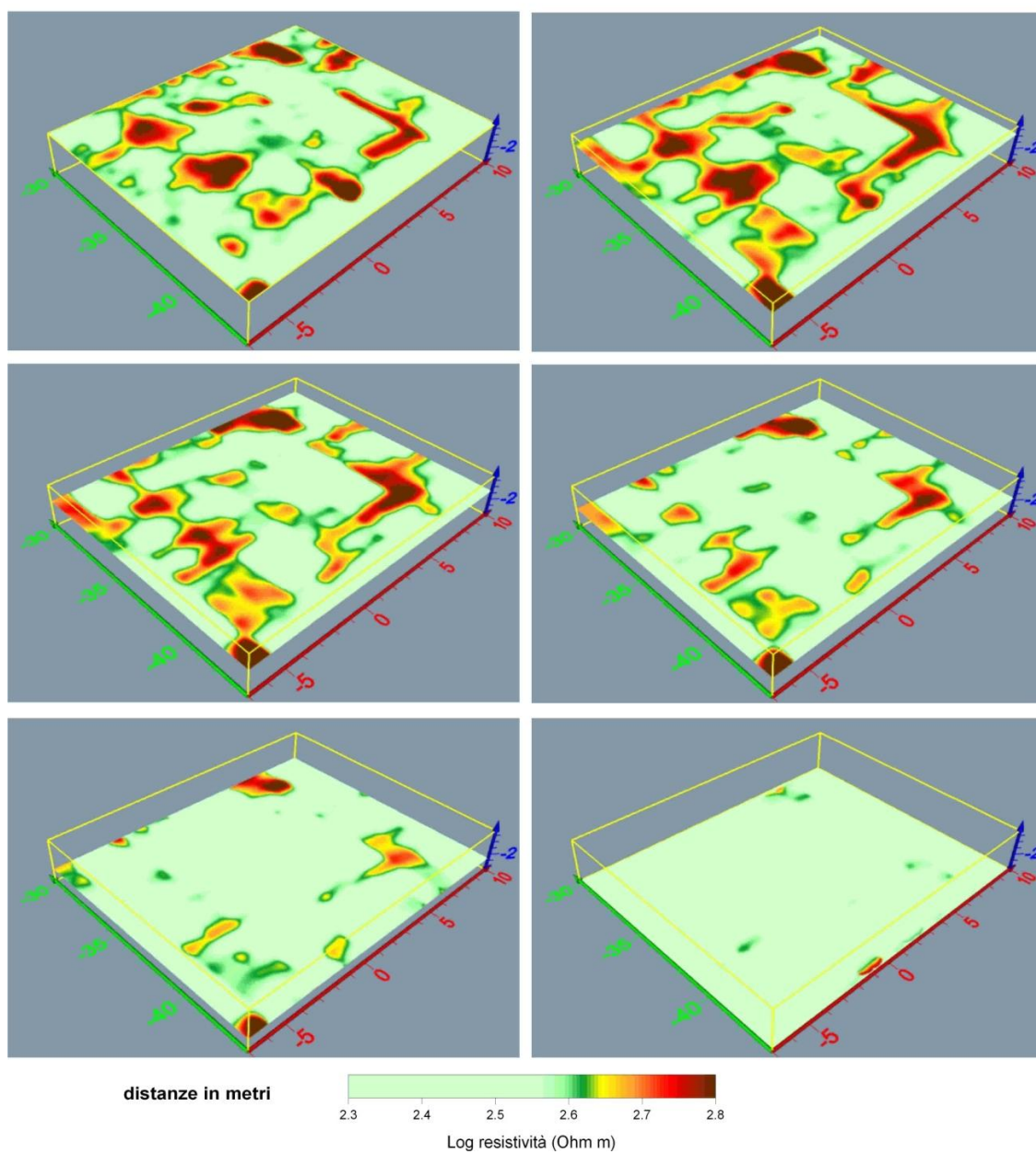


Figura 4.11 – Tomografia di resistività: sezioni orizzontali.

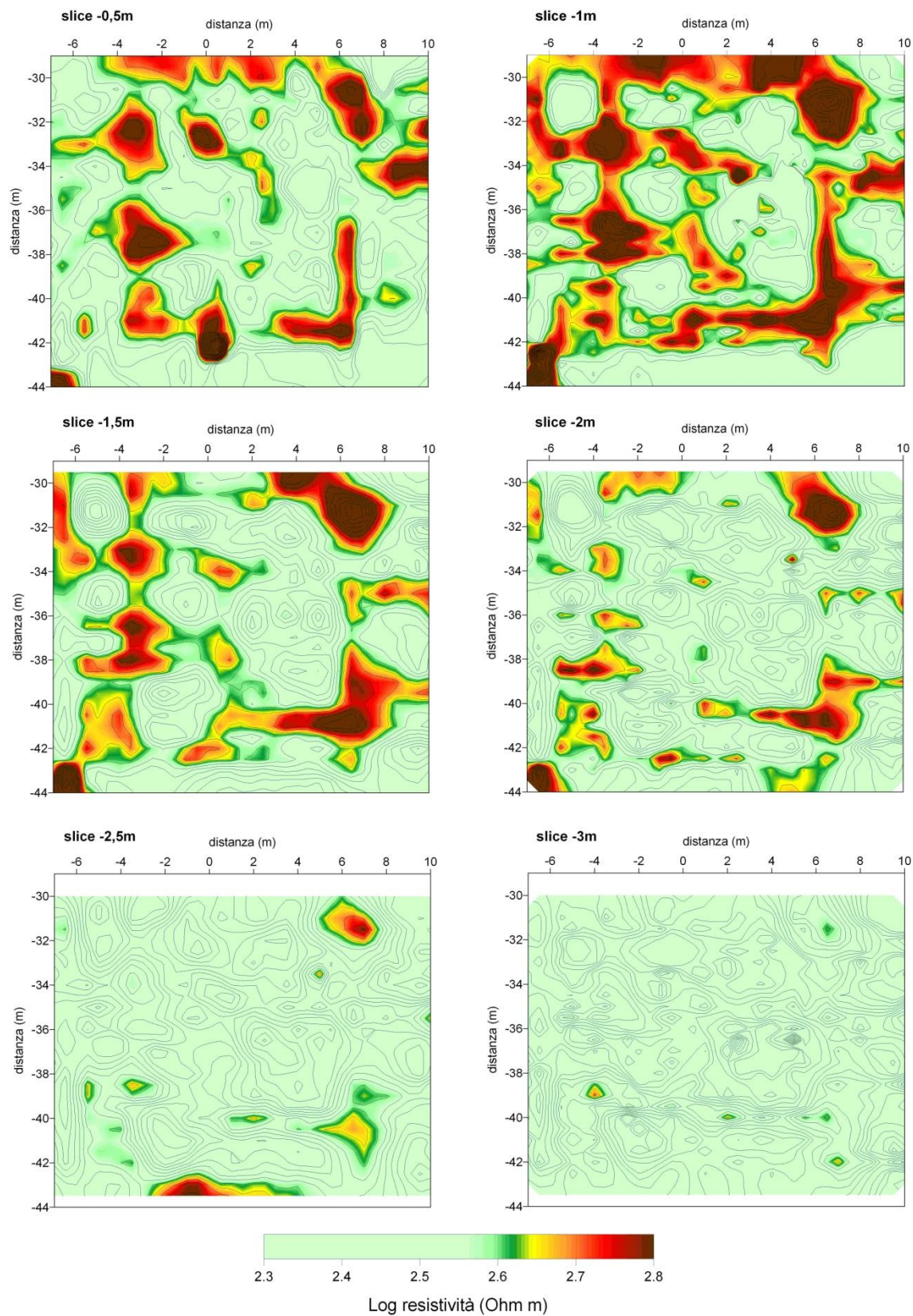


Figura 4.12 – Tomografie orizzontali 2D del volume investigato relative a varie profondità.

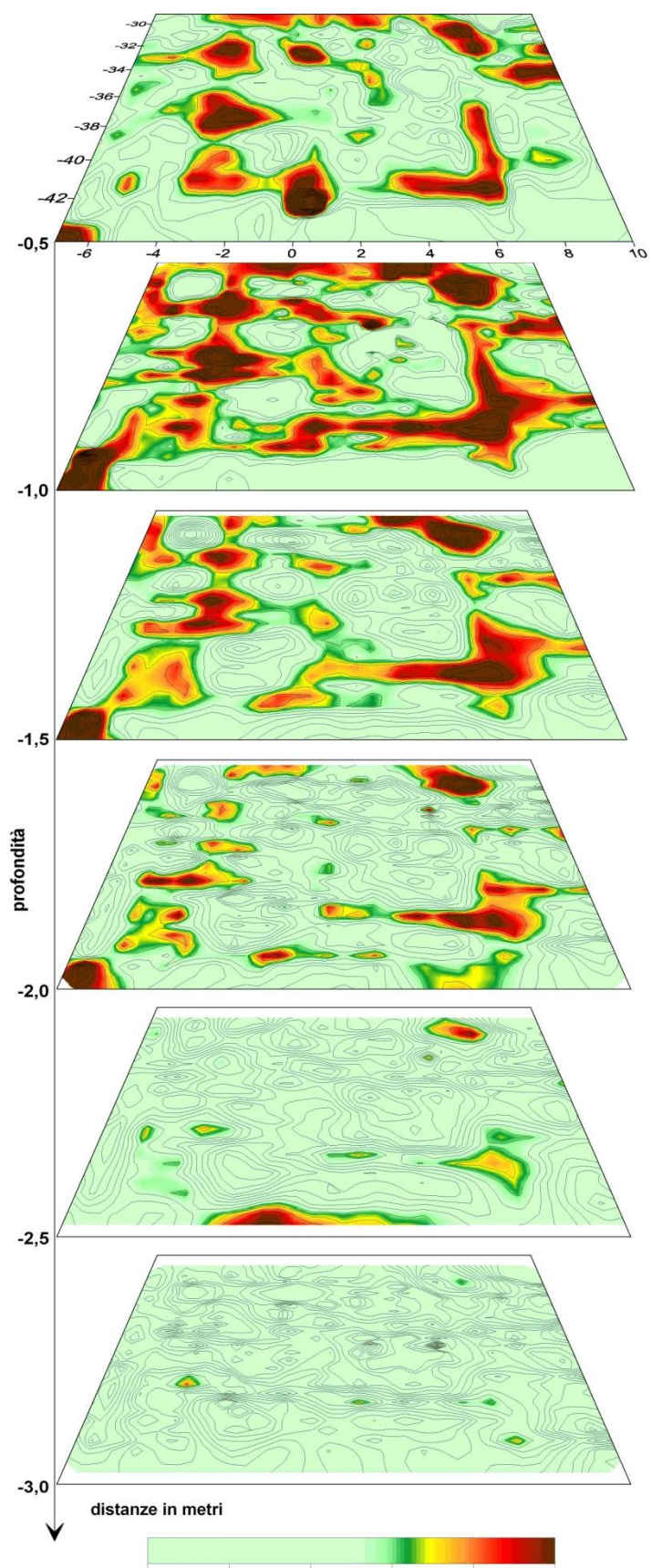


Figura 4.13 – Tomografie di resistività realizzate ogni 0.50m

4.2.1 LE AREE DI INDAGINE

Come già detto, le aree da indagare sono state stabilite in collaborazione con gli archeologi impegnati sul campo; nel complesso ne sono state individuate 7, delle quali 5 in stretta connessione con l'antica città (*Figura 4.14*) e 2 distanti dal sito, intercettate durante la fase di ricognizione effettuata dall'università di Bari e segnalate in base al tipo e al consistente numero di reperti archeologici.

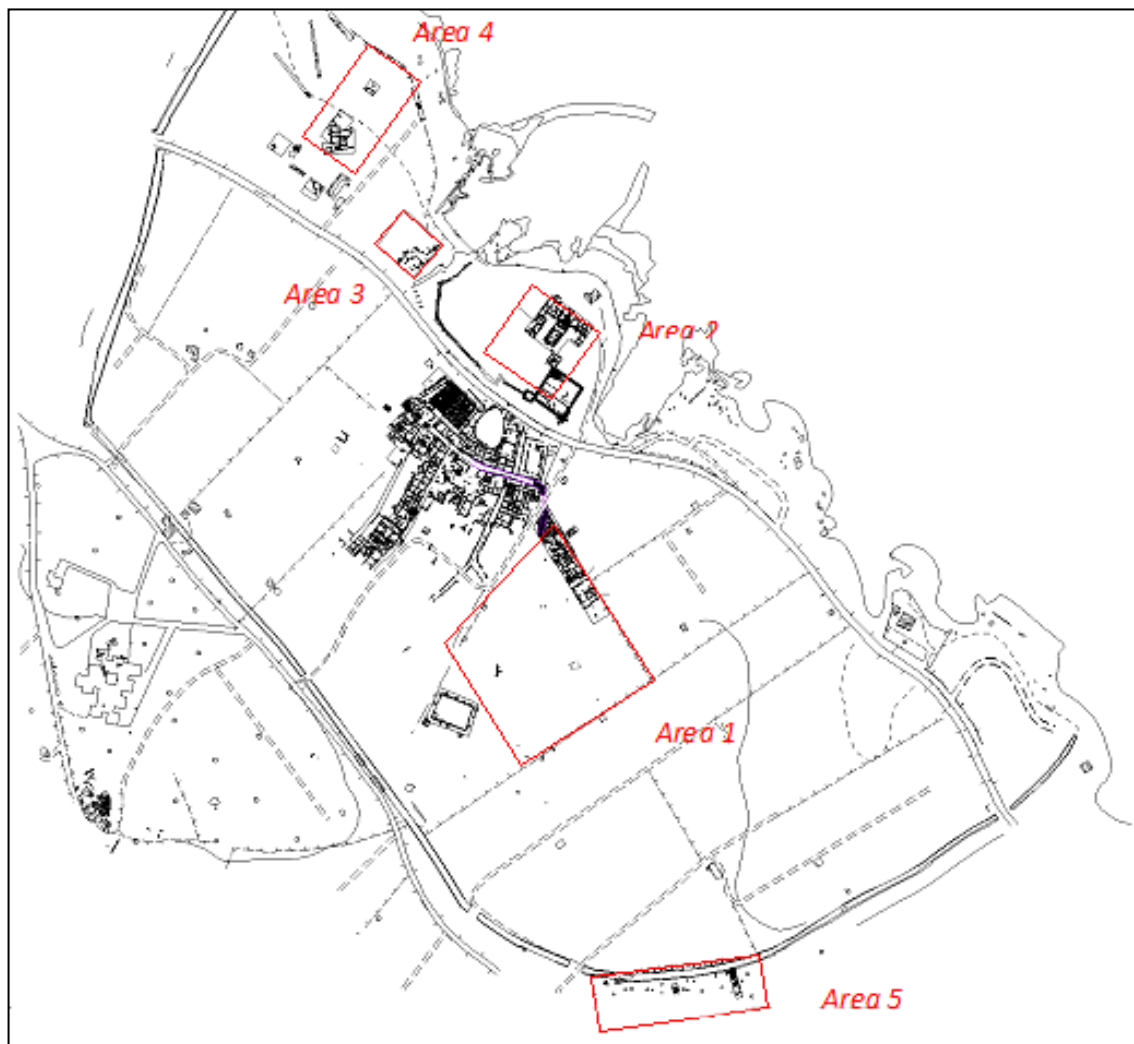


Figura 4.14 – Planimetria generale con l'indicazione delle 5 aree d'indagine.

Da sottolineare che la conformazione e misura delle aree indagate è stata modificata di volta in volta, poiché in base ai risultati preliminari si è deciso di allargare le indagini seguendo le anomalie che passo dopo passo venivano evidenziate dalle sezioni geofisiche. Per il posizionamento topografico dei profili ci si è agganciati ad un rilievo eseguito dal gruppo di ricerca della Prof.ssa Raffaella CASSANO (Università degli Studi

di Bari, coordinatrice dei lavori di scavo archeologico); ciò è stato possibile poiché per ogni griglia creata sul campo sono stati effettuati dei rilievi topografici mediante stazione totale in modo da restituire i dati georeferenziati.

4.2.1.1 AREA 1

Situata a sud del foro della città (*Figure 4.14, 4.15*), comprende tutta la fascia situata tra le terme e il criptoportico. Considerando la forma e la notevole estensione dell'area, per la fase di acquisizione del dato, si è proceduto a dividere l'intera superficie in più settori; successivamente, in fase di elaborazione, i risultati sono stati assemblati al fine di creare un'unica tomografia e avere un quadro generale delle anomalie alto-resistive intercettate. La tomografia ricavata, corredata di una mappa d'interpretazione, ha permesso la programmazione di interventi archeologici mirati. Inoltre l'integrazione dei dati geofisici con lo studio in ambiente GIS della cartografia storica e moderna, l'analisi di immagini aeree e satellitari multispettrali, multitemporali e multi scalari (MIVIS, QuickBird, Google Earth™) effettuato dal mio collega il Dott. Vincenzo Gentile nell'ambito della ricerca di dottorato, ha permesso una lettura più esaustiva della viabilità urbana di Egnazia.

Le indagini geofisiche sono state condotte con lo scopo principale di individuare, tramite mappe di resistività tridimensionali ricavate a più profondità, l'articolazione delle strutture ancora sepolte. La mappa che è risultata più dettagliata è quella realizzata a 1m di profondità (*Figura 4.16*), sulla quale è stata sovrapposta una mappa interpretativa per facilitarne la lettura geometrica delle anomalie (*Figura 4.17-4.18*).

I dati evidenziano in modo chiaro numerose anomalie alto-resistive (in rosso) disposte su tutta l'area; tracciando l'andamento di tali anomalie è stato possibile ipotizzare la presenza di una fitta maglia di strutture murarie (segmenti blu) (*Figura 4.17-4.18*) corrispondenti, con ogni probabilità, ad ambienti divisi in isolati dalle tre arterie stradali (evidenziate in fucsia) (*Figura 4.18 nn. 1-2-3*).

Per quanto riguarda le strutture, è chiara una loro diversa articolazione: il complesso posizionato più ad est, connesso alle due arterie intercettate e ipoteticamente appartenenti l'una alla *via Traiana* e l'altra ad un asse secondario (*Figura 4.18 nn. 1-2*) presentano lo stesso orientamento di quelle già evidenti in prossimità delle terme e quindi probabilmente appartengono allo stesso periodo storico; al contrario, il

complesso ad ovest presenta un diverso sviluppo (più obliquo) rispetto agli altri ambienti e sembrerebbero adattarsi alla presenza di una strada (*Figura 4.18 n. 3*), il che indicherebbe una cronologia posteriore.

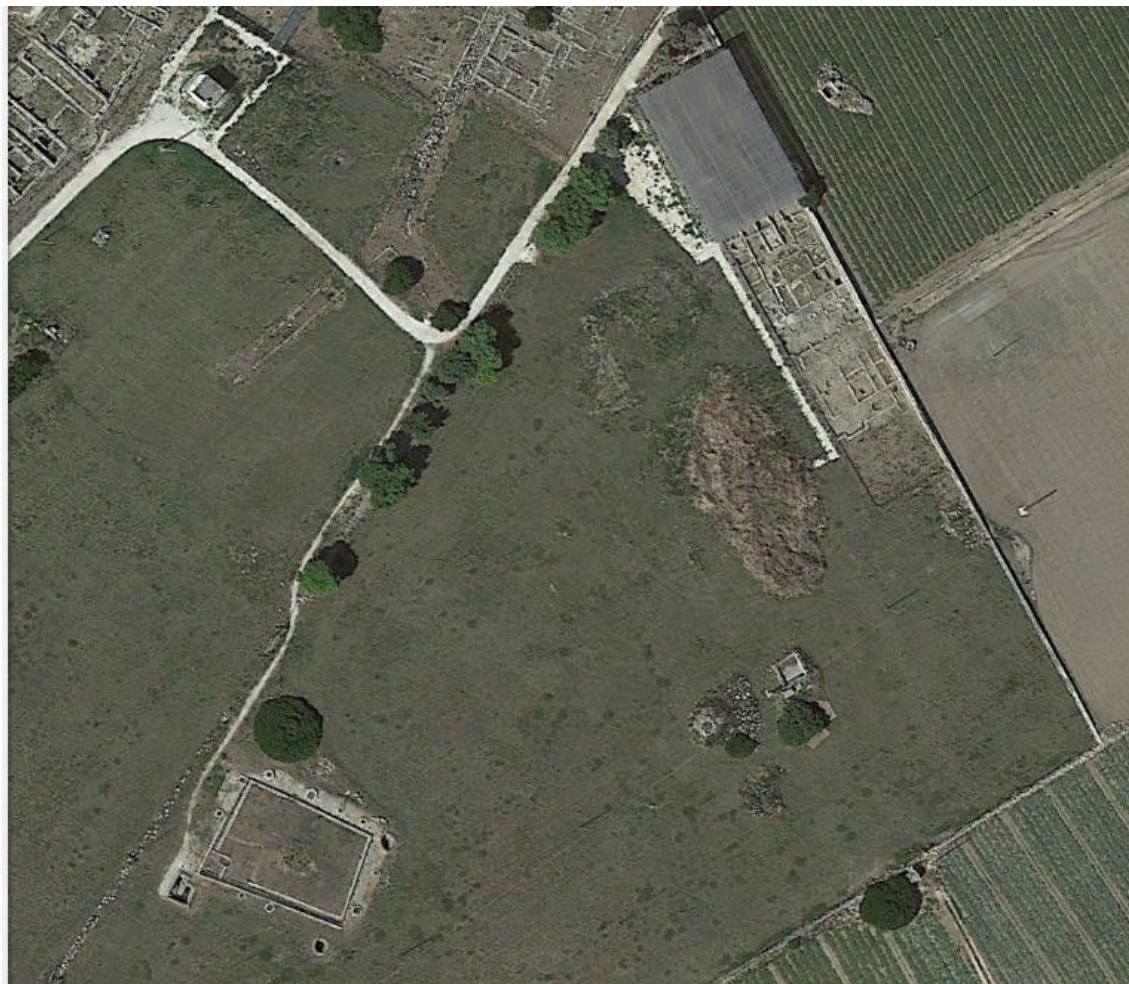


Figura 4.15 – Foto aerea dell'area 1 (da Google Earth).

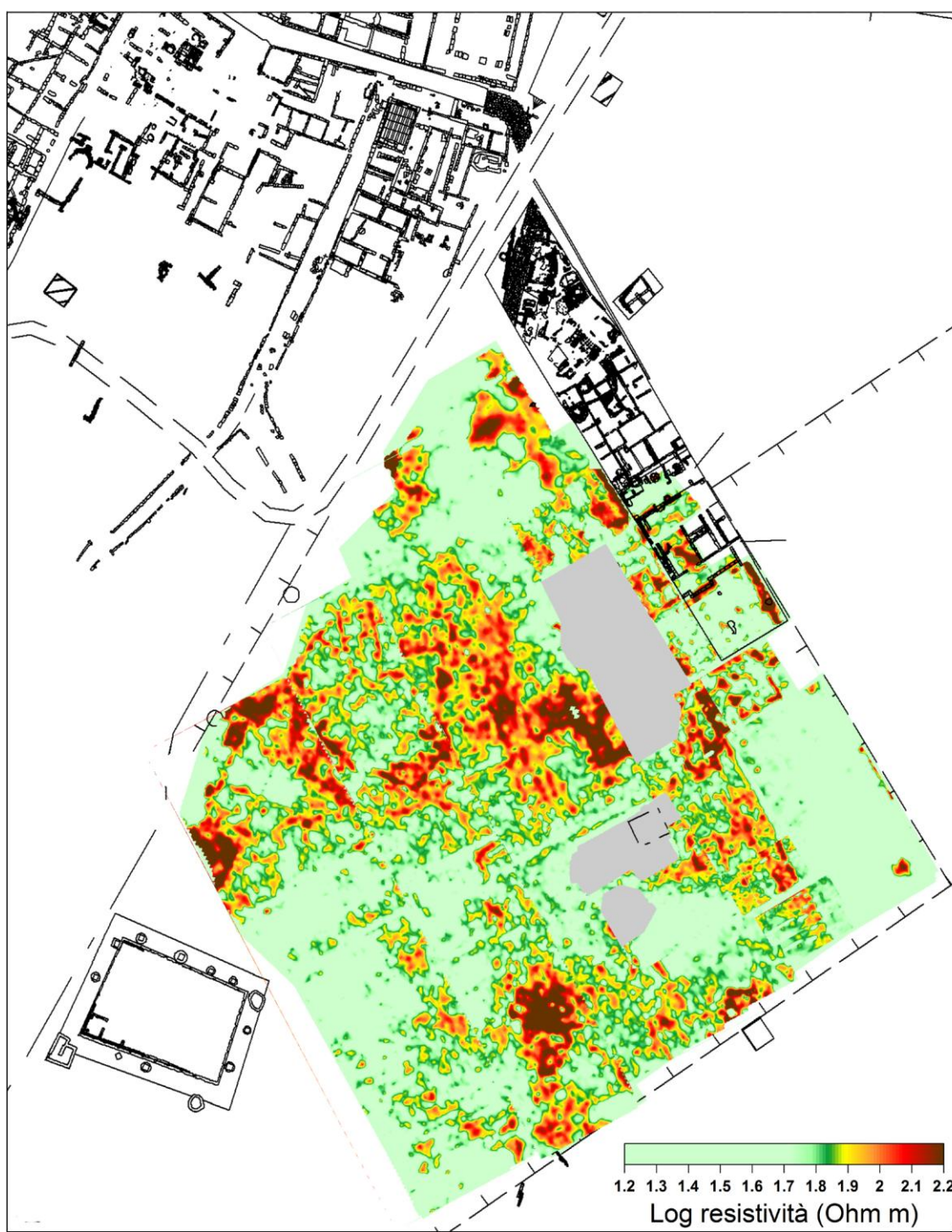


Figura 4.16 – Tomografia dell'Area 1. Gli spazi grigi indicano le zone dove non è stato possibile effettuare le prospezioni per la presenza di cumuli di terra.



Figura 4.17 – Tomografia dell'Area 1 con la sovrapposizione della mappa interpretativa: in blu l'articolazione delle possibili strutture, in fucsia sono indicate le possibili arterie stradali.



Figura 4.18 – Mappa interpretativa dell'Area 1. I numeri indicano le possibili arterie stradali: n.1 via Traiana, nn. 2-3 assi secondari.

Il dato geofisico così ottenuto, ha confermato quanto ipotizzato precedente durante il lavoro di fotointerpretazione. Con l'elaborazione delle immagini telerilevate (*Figure 4.19-4.20*) sono state individuate alcune tracce lineari inerenti a possibili percorsi.



Figura 4.19 – In alto immagine telerilevata con MIVIS; in basso l' ortofoto Terra Italy (da Gentile V.).

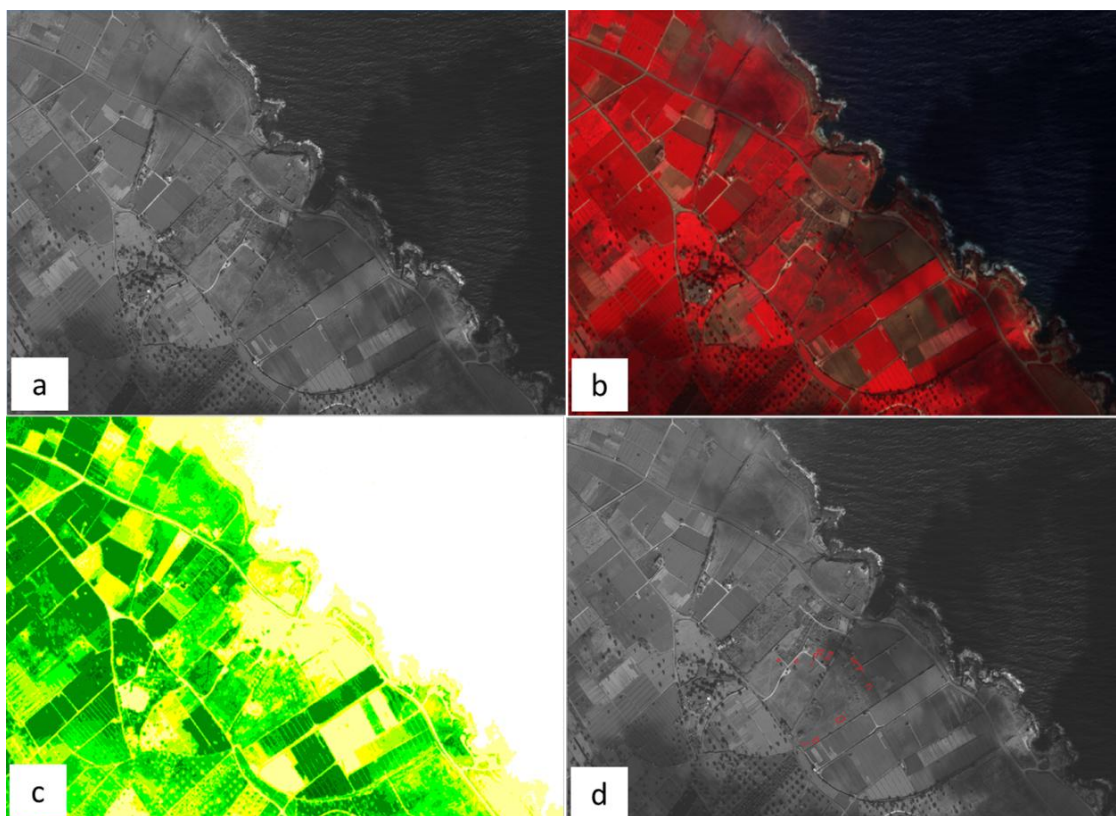


Figura 4.20 – Immagini telerilevate tramite QuickBird (da Gentile V.).

Anche la foto lettura delle immagini aeree ha permesso di individuare alcune tracce chiare disposte sulla superficie del terreno attribuibili a delle strutture archeologiche. La *Figura 4.20* mostra come la natura stessa delle tracce permette di distinguerle dal terreno limitrofo per il colore e tonalità.

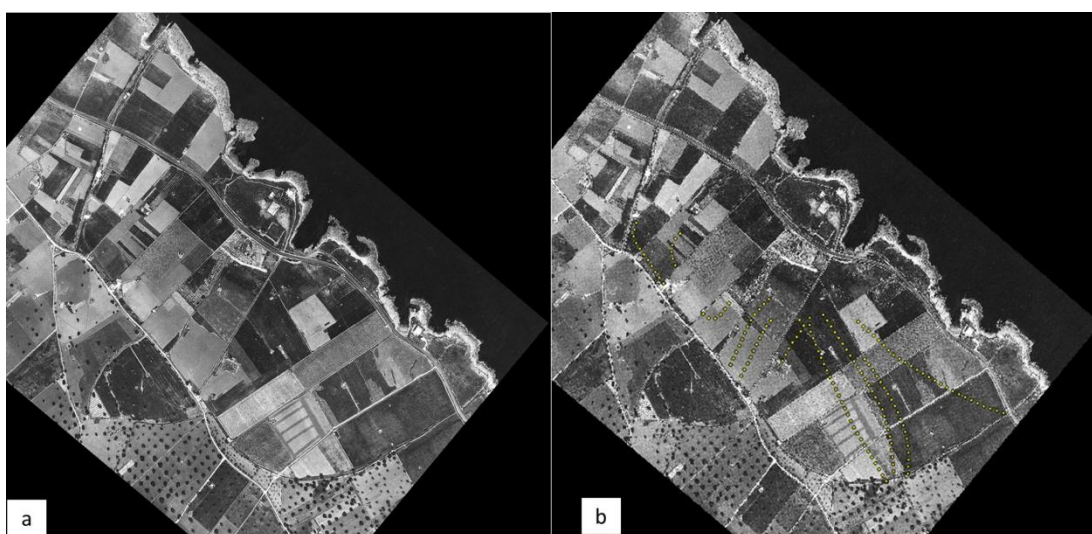


Figura 4.21 – Foto aeree del 1967: in b) sono segnalate le tracce individuate in a) (Ceraudo 2003).

Mentre dalla foto aerea del 2010 (*Figura 4.22*) è stato possibile ipotizzare l'andamento delle strutture in prossimità delle terme e quindi programmare le modalità di acquisizione del dato geofisico.



Figura 4.22 – In alto: foto aerea delle terme; in basso: sovrapposizione del dato geofisico (foto del 2010 concessa dal Consorzio Universitario di Bari, Lab. Centro Aereofotografico)

Per ora solo una parte dell'area in prossimità dell'impianto termale in è stata soggetta a scavi archeologici. Sono stati portati in luce una serie di strutture murarie che hanno confermato l'ipotesi sull'orientamento e l'articolazione dedotta delle anomalie intercettate dalle prospezioni (*Figura 4.23*).

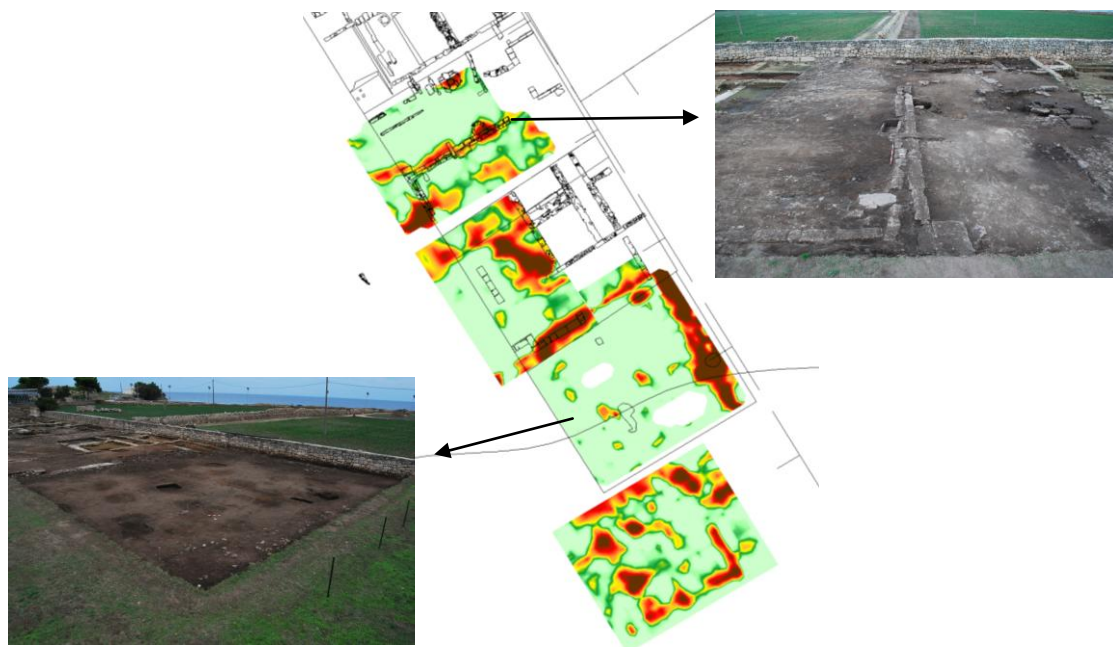


Figura 4.23 – Tomografia e immagini dello scavo archeologico relative alla medesima area.

4.2.1.2 AREA 2

L'Area 2, situata sull'acropoli, è stata indagata in quattro zone differenti, due situate internamente allo scavo archeologico e due immediatamente all'esterno (*Figure 4.24*).

Scopo delle indagini geoelettriche è stato quello di intercettare e capire l'orientamento delle possibili strutture sepolte, al fine di fornire agli archeologi impegnati sul campo una planimetria del sottosuolo quanto più completa possibile utile per chiarire lo sviluppo urbanistico di questo settore dell'antica città.

Dalla mappa di resistività (*Figura 4.25*) è evidente la presenza di anomalie alto-resistive (in rosso) con forma molto lineare localizzate nel primo sottosuolo; la loro tipologia e organizzazione nello spazio, la cui lettura è stata facilitata con delle linee guida (*Figura 4.26*, in blu), farebbe pensare a delle strutture antropiche o ambienti connessi all'impianto già scavato.

Nell'immagine è chiaro che l'orientamento di tutti i tratti segnalati è uguale a quello dei tratti murari riportati in luce, il che può suggerire l'appartenenza ad una stessa fase

cronologica; in particolare per l'anomalia A (in fucsia) si potrebbe ipotizzare la presenza di un crollo all'interno di un edificio, poiché per l'intera superficie sono stati restituiti valori ad alta resistività (*Figura 4.26*).

Si attende l'esito degli interventi archeologici per confermare con certezza quanto ipotizzato e chiarire la natura stessa delle anomalie riscontrate.

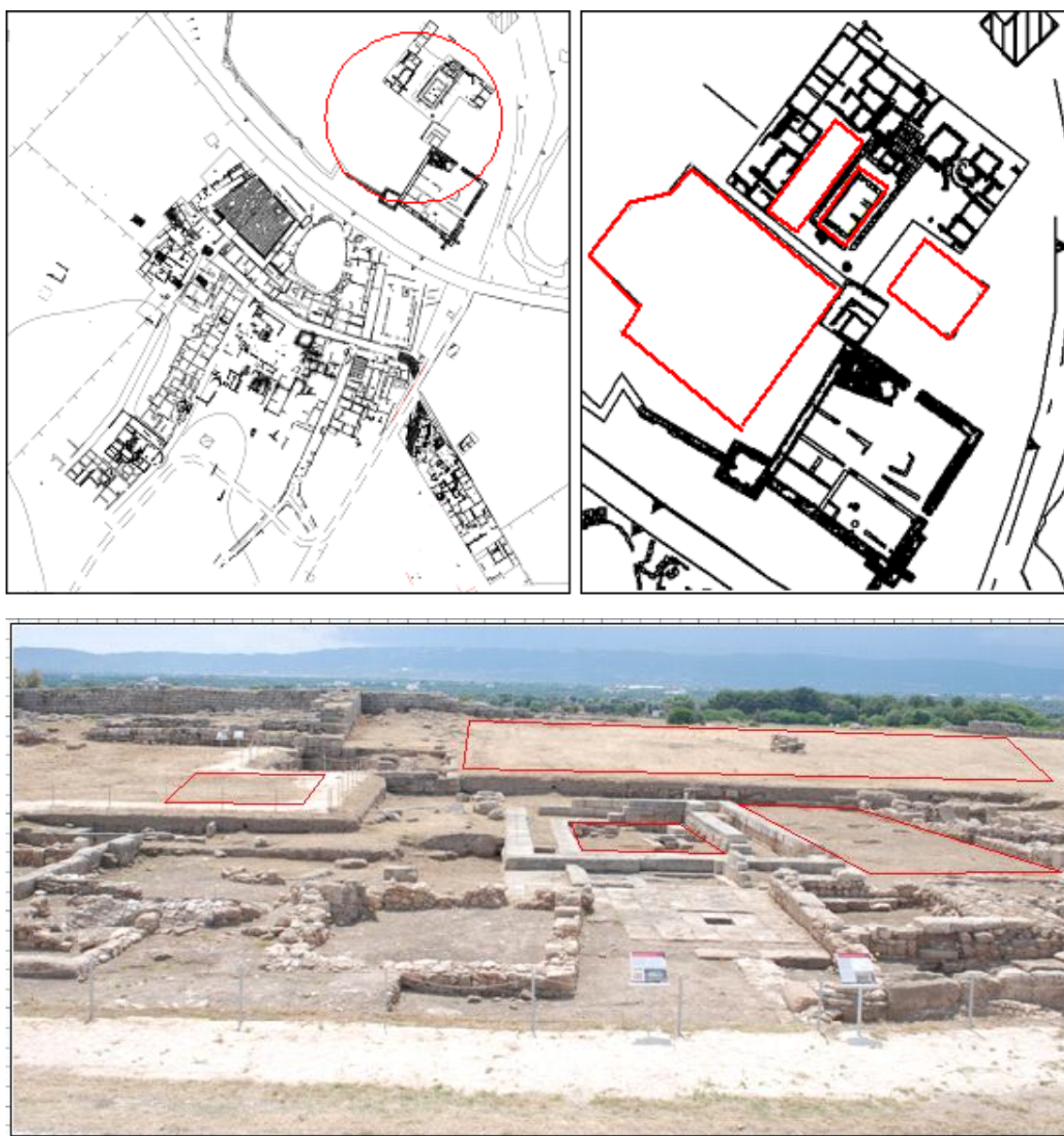


Figura 4.24 – In alto: planimetria con l'indicazione dell'area 2 (cerchiata in rosso) e (a destra) particolare dell'acropoli con le quattro aree d'indagine; in basso: foto dell'area di scavo con l'inquadramento delle zone indagate.

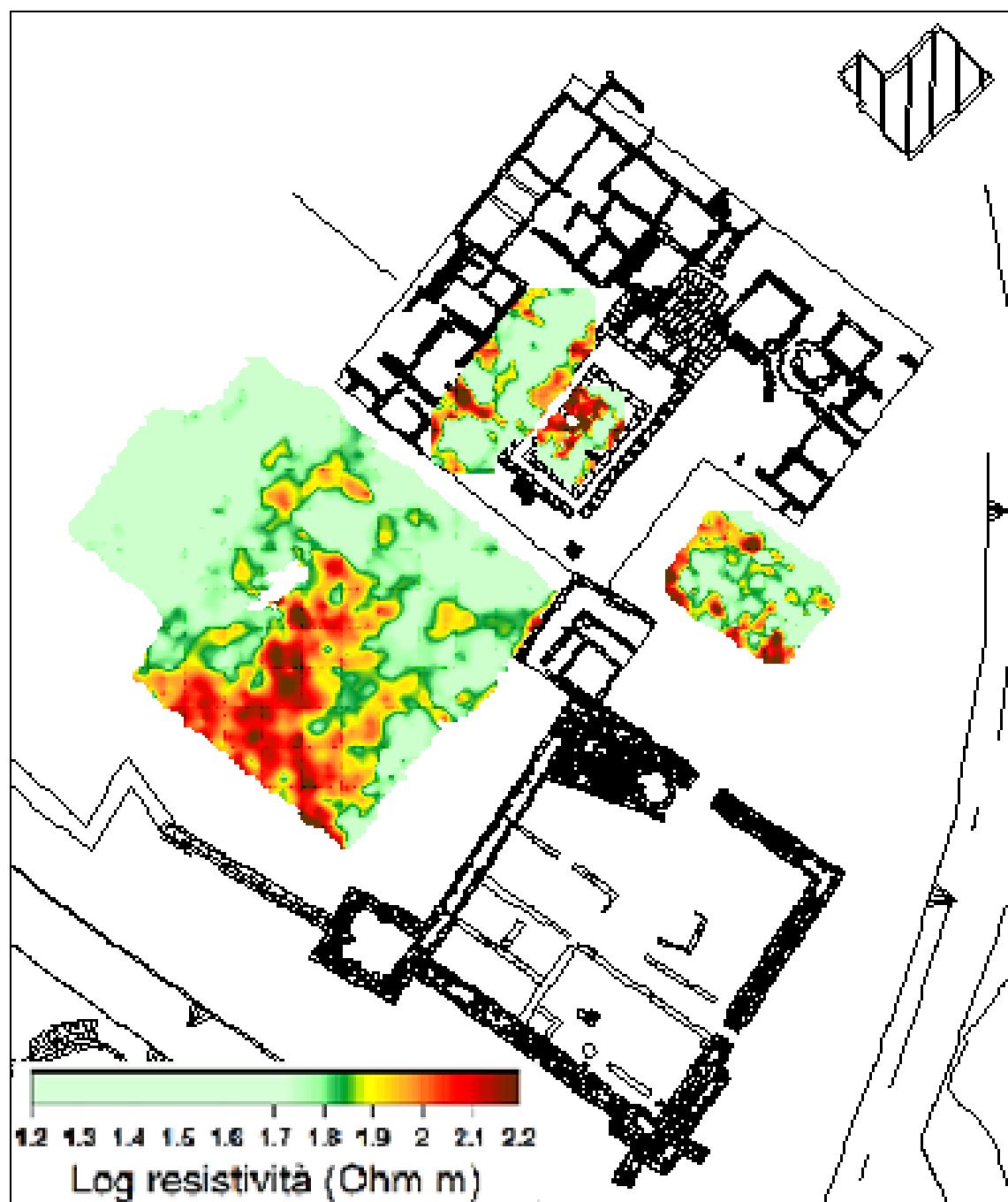


Figura 4.25 – Planimetria dell'area 2 con la sovrapposizione delle tomografie.

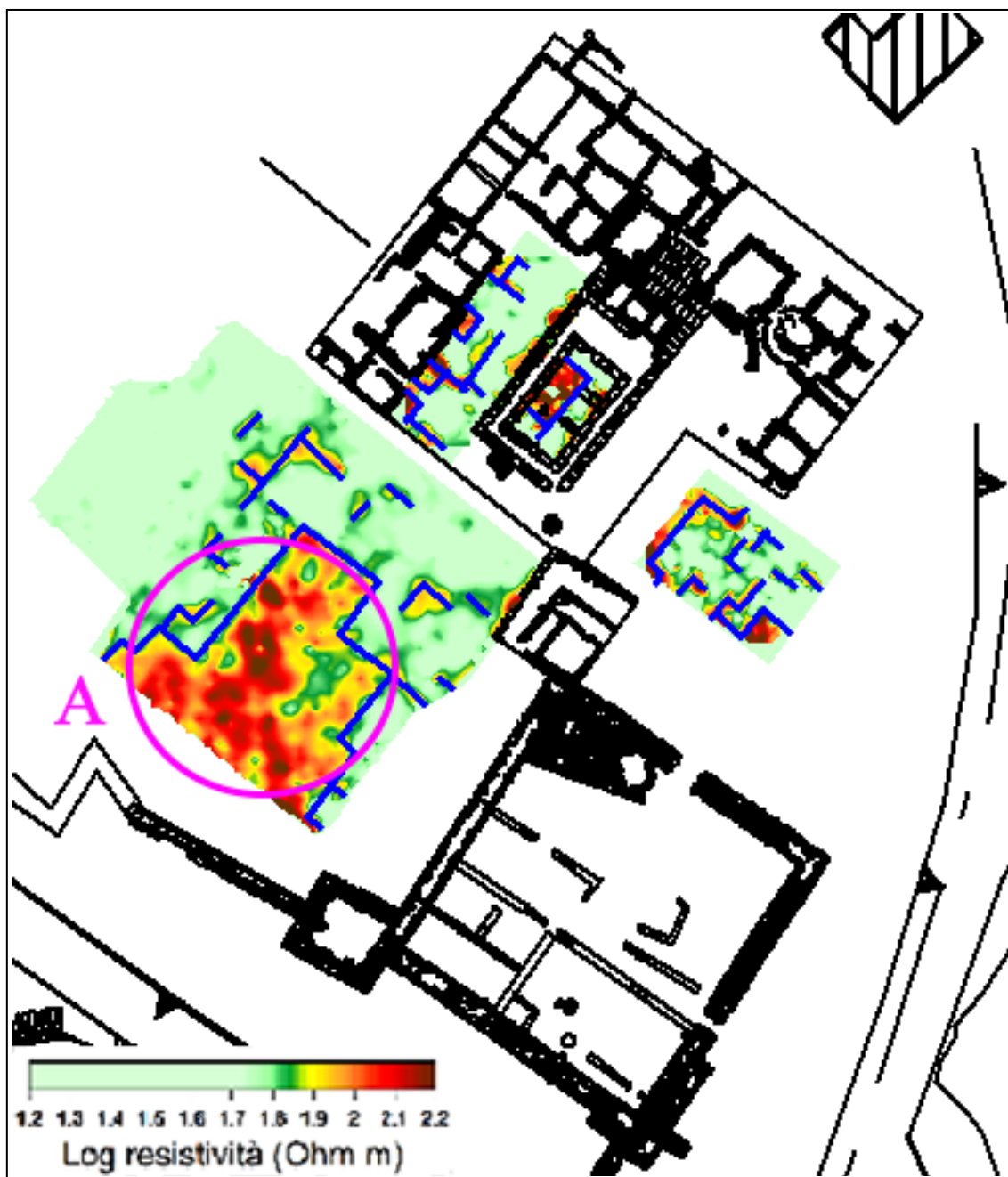


Figura 4.26. Area 2, acropoli: mappa di resistività e interpretazione delle anomalie alto-resistive (in blu).

4.2.1.3 AREA 3 – AREA 4

Le aree 3 e 4 corrispondono alla zona situata nella parte nord-ovest del sito chiamata Penna Grande. Le prospezioni, condotte in modalità geoelettrica, sono state svolte nel 2009 nell'ambito di una collaborazione nata tra la Direzione Regionale per i Beni Culturali e Paesaggistici della Puglia e l'Università degli Studi del Molise; in

quell'occasione ho avuto la possibilità di rientrare nel progetto di ricerca e cooperare con i ricercatori molisani impegnati sul campo.

Le aree indagate sono distanti poche decine di metri, come mostra la *Figura 4.27*.

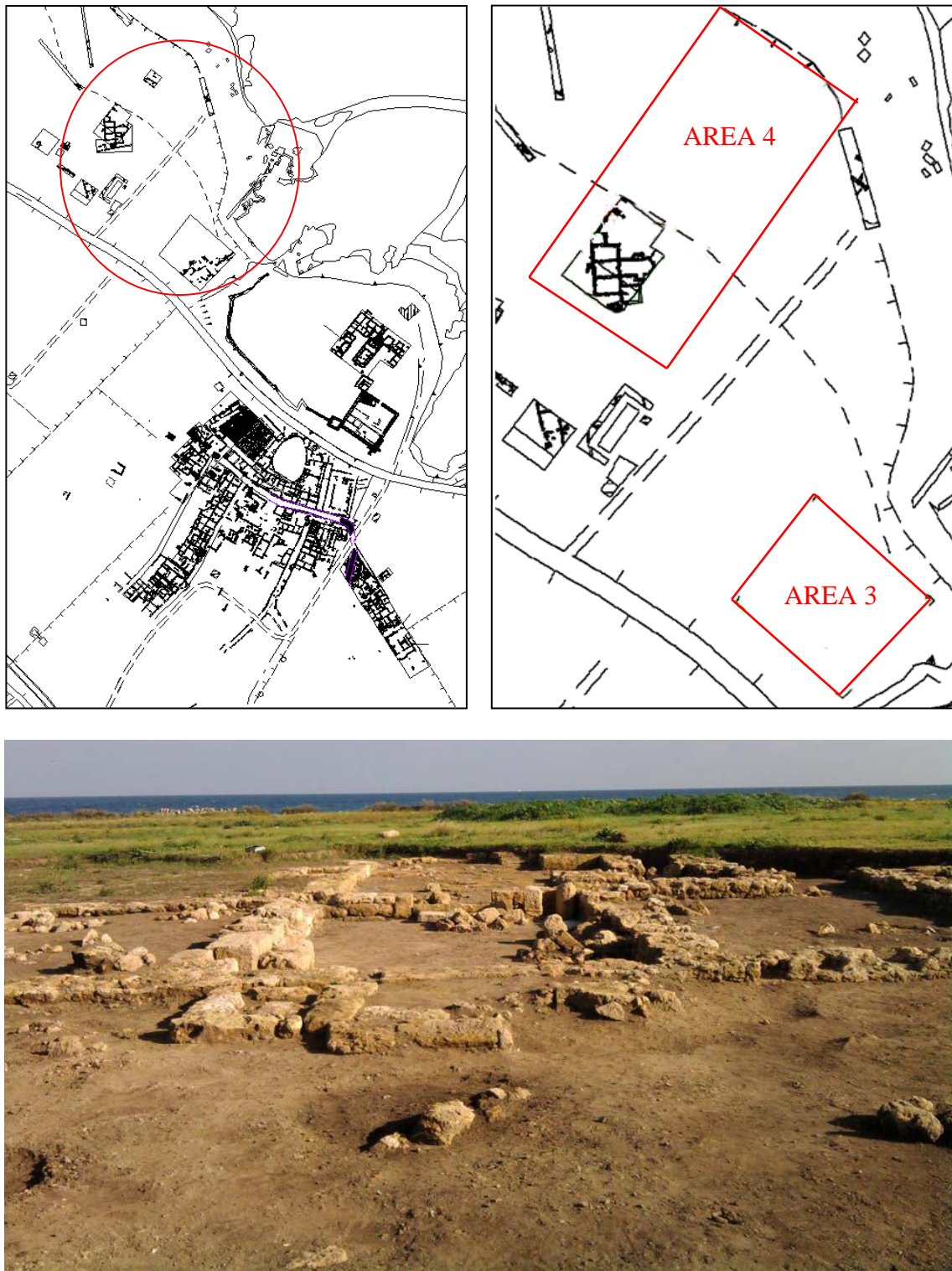


Figura 4.27 - In alto: planimetria con l'indicazione delle aree 3-4 (cerchio rosso) e (a destra) il loro inquadramento; in basso: foto dello scavo situato nell'area 4.

Scopo dell'indagine era quella di accertare un eventuale presenza di attività antropica nell'area 3, mentre per l'area 4 bisognava effettuare un'indagine preliminare per accertare l'eventuale presenza di strutture sepolte ed una loro ipotetica connessione e/o prosecuzione con quelle messe in luce durante i lavori di edificazione di un complesso balneare, al fine di ridurre i costi e il tempo delle ricerche archeologiche indirizzando in modo mirato e sicuro le operazioni sul campo. Entrambe le aree sono state investigate creando sulla superficie una griglia regolare, in modo da poter acquisire una serie di profili paralleli posizionati ad una distanza variabile tra 1 ed 1.5m, con differenza elettrodica di 1m. Sulle tomografie orizzontali (Figura 4.28) sono state successivamente segnalate le anomalie significative intercettate a circa 1m di profondità (Figura 4.29).

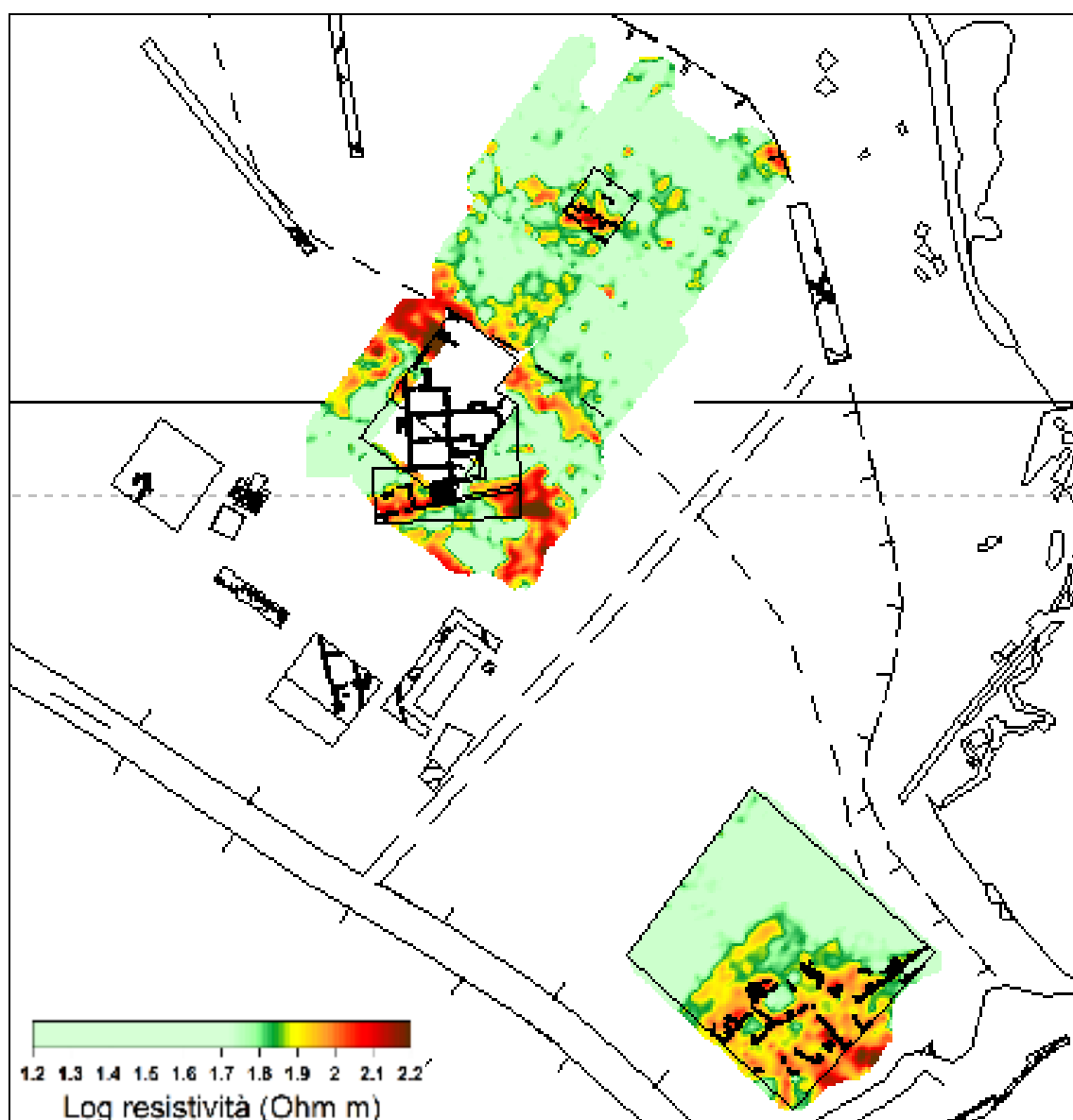


Figura 4.27 - Planimetria con la sovrapposizione delle tomografie relative a 1m di profondità.

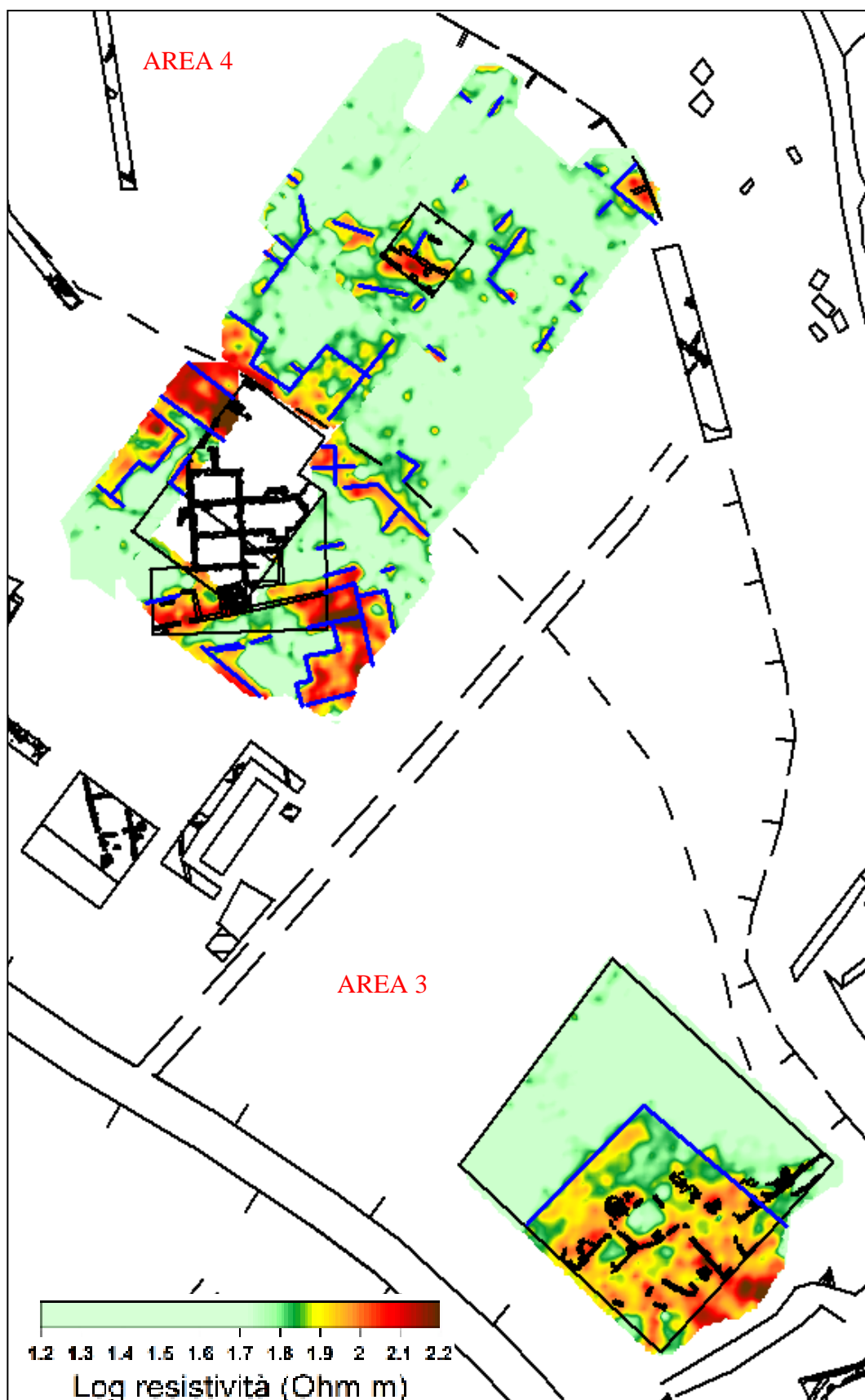


Figura 4.28 - Area 3-4: sovrapposizione del dato geofisico (interpretazione in blu) con in dato archeologico (rilievo in nero).

Per tutte e due le aree, si può osservare che in tutta la superficie sono presenti anomalie di resistività con forma geometrica ben definita riconducibili a strutture murarie e ambienti.

Nel caso dell'*area 3* è presente una notevole anomalia dalla forma ben definita e angolare con all'interno allineamenti regolari. Nell'*area 4* le anomalie ad alta resistività hanno una forma molto netta con andamento lineare e sono orientate in modo regolare e con angolazioni abbastanza corrispondenti; a queste fanno contrasto altre anomalie, posizionate quasi perpendicolarmente rispetto alle precedenti.

In base a quanto ipotizzato sono stati condotti saggi di scavo nelle posizioni suggerite dalle prospezioni; i risultati hanno infatti confermato la presenza e l'orientamento delle strutture emerse con le anomalie del dato geofisico (*Figura 4.29*).



Figura 4.29 – Strutture emerse durante lo scavo a sud dell'area 4 programmato in base al dato geofisico.

4.2.1.4 AREA 5

Anche il sito di Masseria Cimino, come le *Aree 3 – 4*, è stato indagato in collaborazione con altri ricercatori dell'Università degli Studi del Molise. Le indagini, a cui ho preso parte attivamente, dovevano fornire uno strumento in più per l'identificazione dello sviluppo e dell'articolazione della cinta muraria lungo il tratto sud-orientale del circuito, nonché accertare la presenza del fossato. L'area da indagare è stata individuata sul

campo grazie ad una fotografia aerea del 2006: nella foto è evidenziata in verde la zona dove, secondo l'equipe della Prof.ssa Cassano, è collocato il fossato (Figura 4.29-4.30).



Figura 4.29 - Fotografia aerea di Egnazia (Ceraudo 2006): in verde l'area ipoteticamente occupata dal fossato, in rosso è cerchiato l'areale indagato.

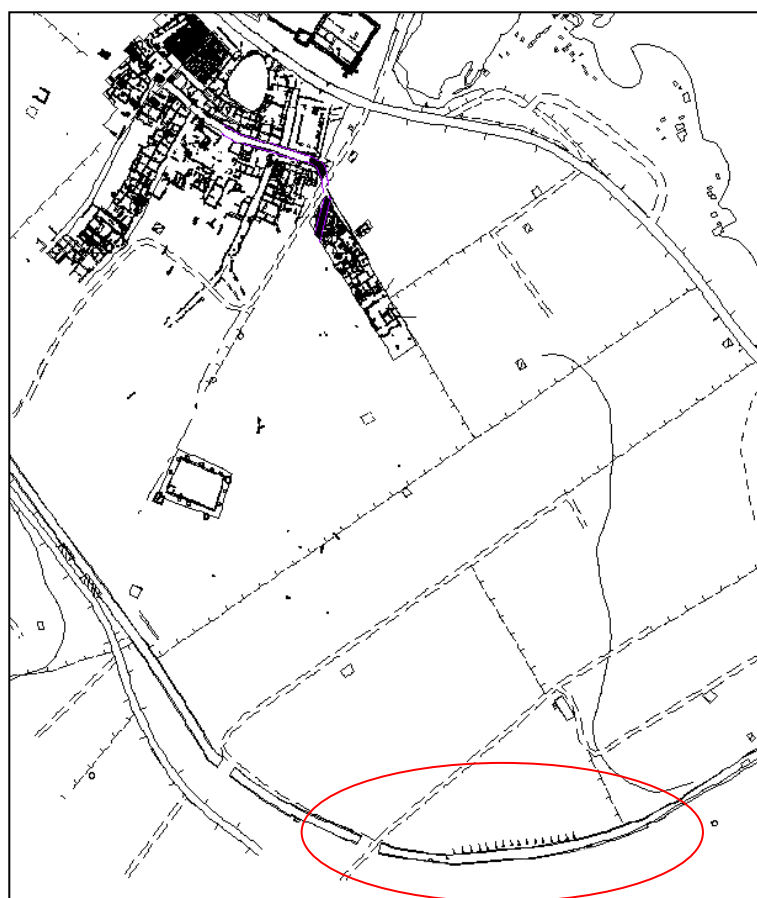


Figura 4.30 – Planimetria del sito con l'indicazione dell'area di indagine.

Dal momento che la zona risulta essere di proprietà privata e quindi in parte destinata ad oliveto e colture seminative, lo spazio incolto non risultava essere molto esteso. Le ricerche si sono dunque concentrate nella parte centrale della fascia, quella meno occupata da vegetazione e più ricca di rinvenimenti archeologici, ed è stata coperta cercando di seguire il più possibile l'andamento del circuito. A differenza delle altre aree, in base alla logistica del sito, si è scelto di utilizzare la tomografia geoelettrica in corrente continua, macchina A-3000E; le misure sono state eseguite lungo profili paralleli posizionati all'interno di una griglia studiata a priori per ospitare stendi menti con 32 elettrodi a distanza dipolare compresa tra 1 e 1.20m. Dall'elaborazione dell'intero set di dati, è stato creato un volume del sottosuolo dal quale sono state estratte una serie di sezioni verticali (*Figura 4.31*) al fine di comprendere meglio l'articolazione delle anomalie in profondità. Per ogni sezione è stato effettuato il processo di inversione che ha permesso di ottenere dalla pseudo-sezione l'immagine reale del profilo (*Figure 4.32, 4.33*).

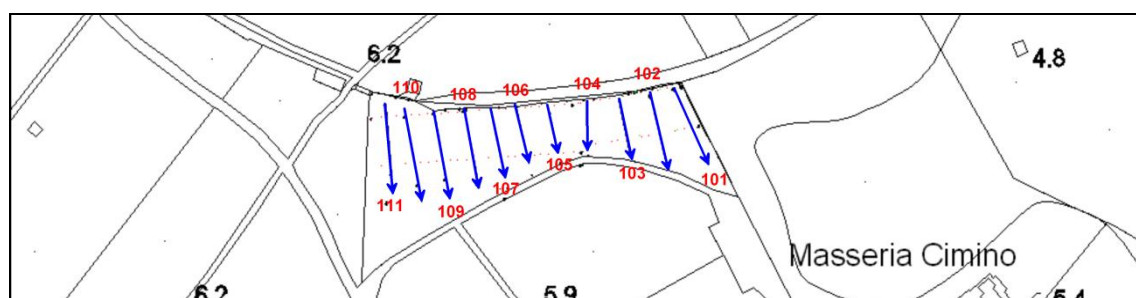


Figura 4.31 – Indicazione delle sezioni verticali.

Posizionando tutti i profili all'interno dell'areale indagato, è stato possibile avere un quadro tridimensionale più definito del sottosuolo (*Figura 4.34*) che ha portato all'estrapolazione di una tomografia orizzontale relativa ai 3m di profondità, per meglio individuare la posizione delle anomalie alto-resistive e basso-resistive rispetto alla cinta muraria (*Figura 4.35*). L'anomalia più significativa è quella basso resistiva (in blu) e si riferisce chiaramente a quello che doveva essere il fossato dell'antica città (tratteggio rosso); ipotesi avvalorata dal suo orientamento che sembra seguire l'andamento del circuito murario. Mentre, le anomalie minori alto-resistive (in rosso) si trovano ai lati del fossato e tra esso e il circuito (linee blu); per la loro forma geometrica suggeriscono la presenza di strutture minori, forse ad elementi di fondazione del muro di cinta. In base a questi risultati, il gruppo di lavoro della Prof.ssa Cassano, ha condotto nelle aree indicate dei saggi di scavo (rilievo in nero) al fine di verificare la natura di tali

anomalie. Dagli scavi sono emersi resti di strutture murarie e il riempimento del fossato che hanno confermato quanto ricostruito dal dato geofisico.

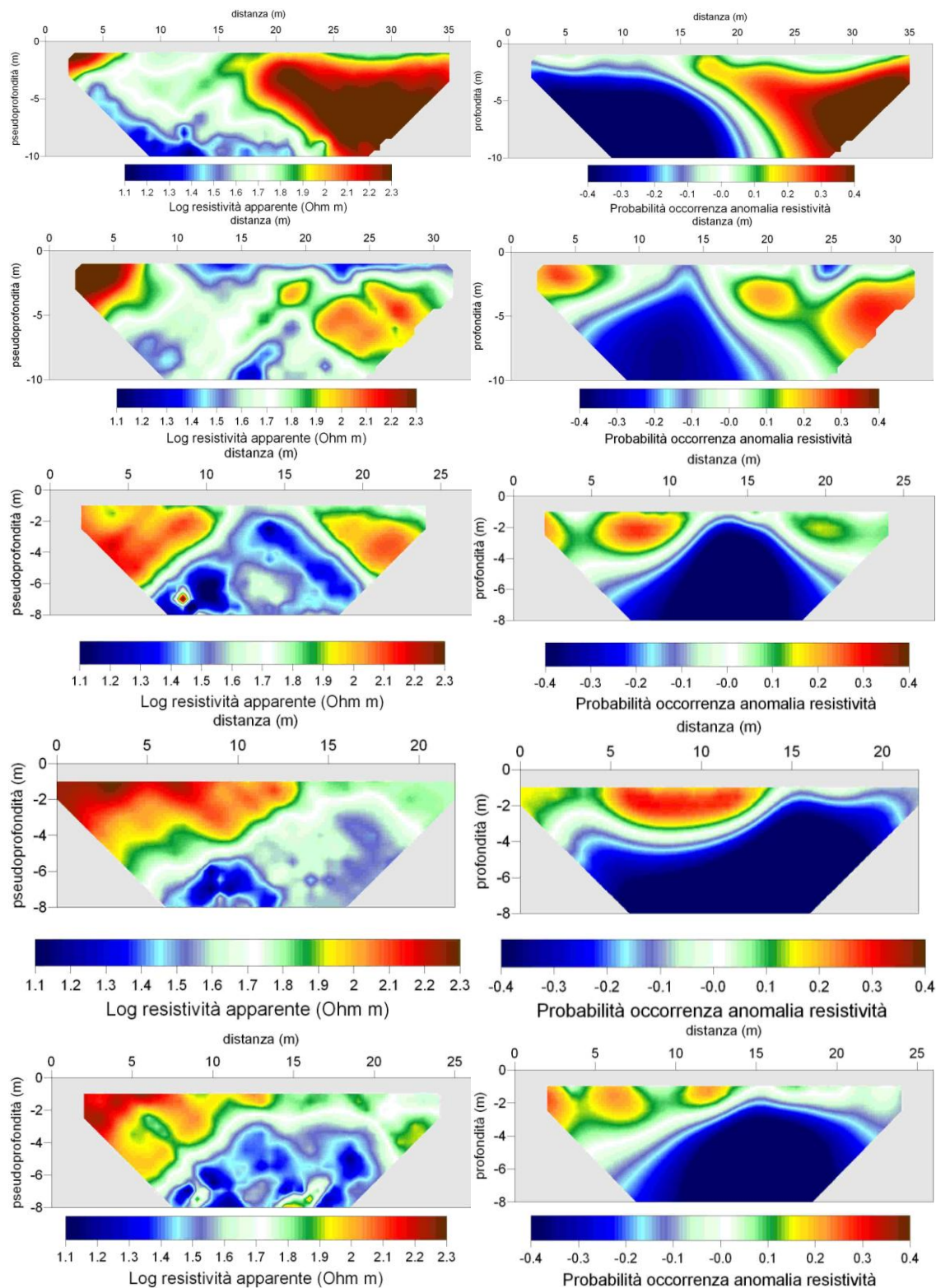


Figura 4.32 – Pseudo-sezioni di resistività (colonna sinistra) e le relative immagini topografiche (colonna destra); dall'alto profilo 101 al 105.

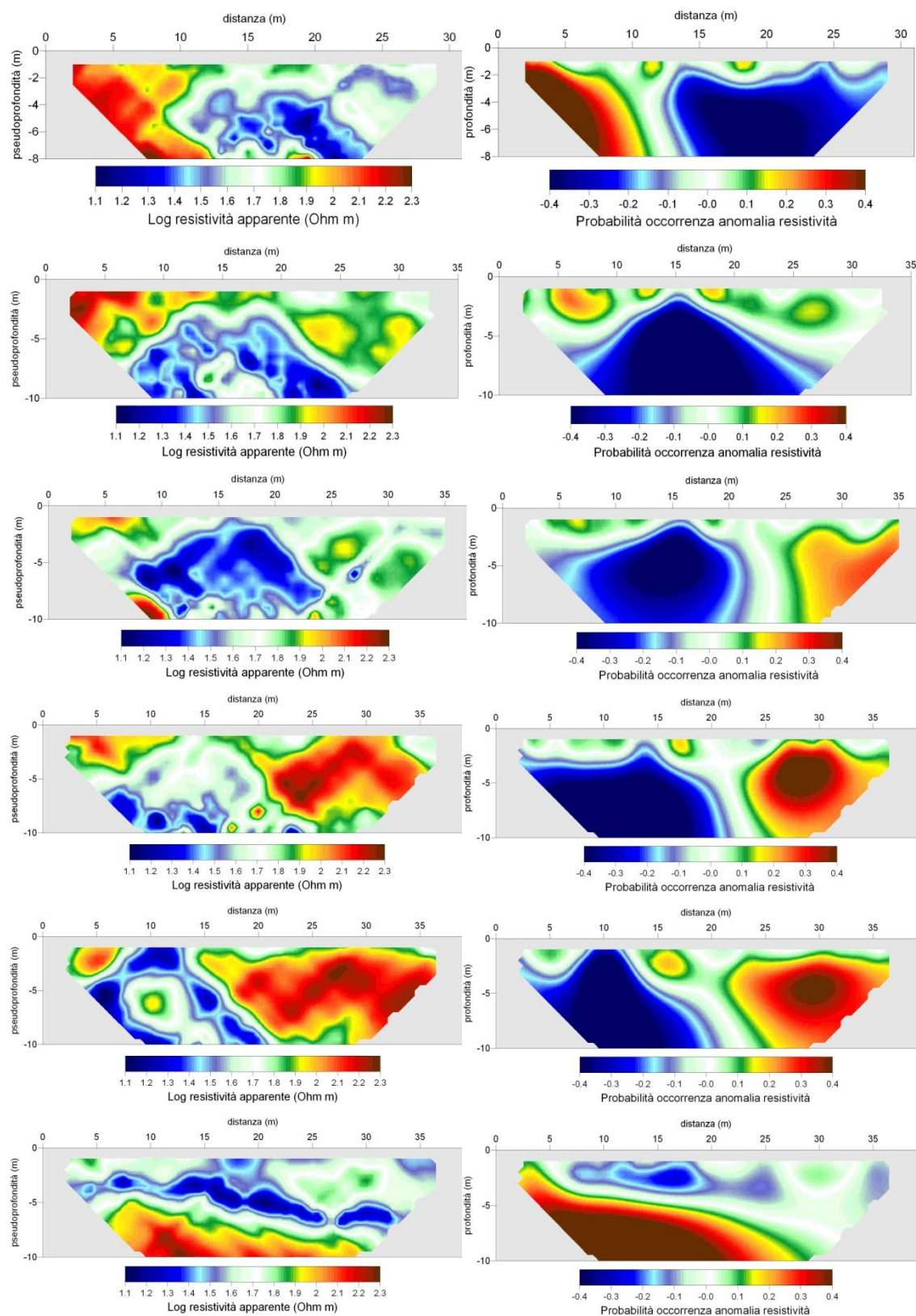


Figura 4.33 – Pseudo-sezioni di resistività (colonna sinistra) e le relative immagini topografiche (colonna destra; dall'alto profilo 106 al 112).

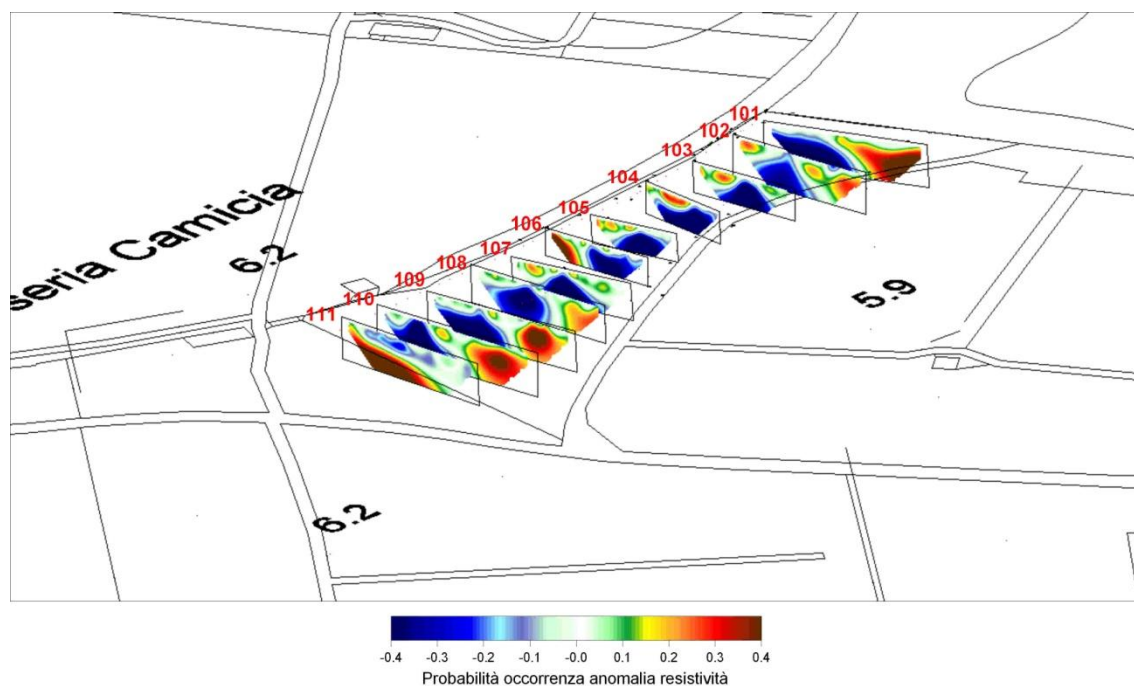


Figura 4.34 – Vista 3D del posizionamento delle sezioni verticali su planimetria.

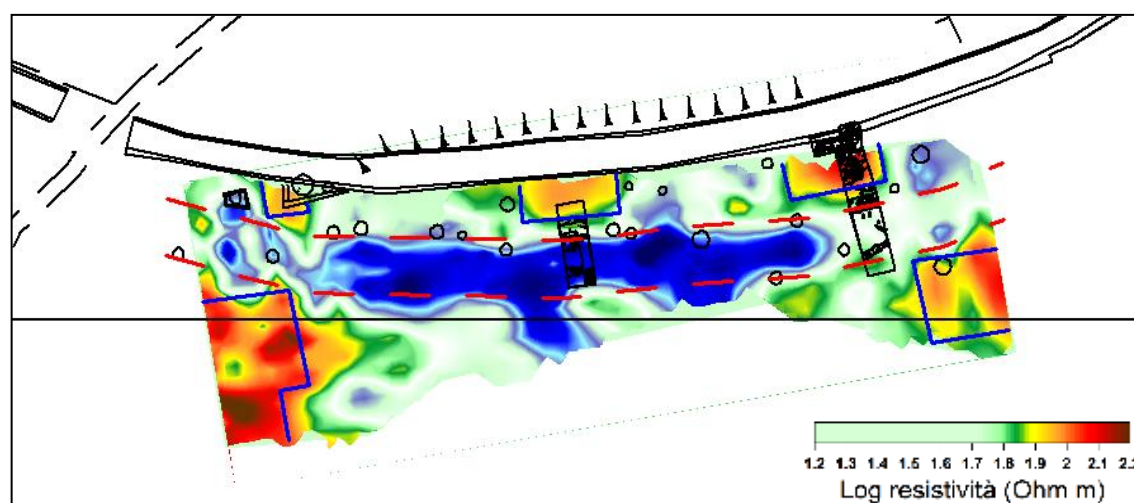


Figura 4.35 - Area 5: sulla tomografia geoelettrica verticale sono state sovrapposte la mappa interpretativa delle anomalie (segmenti blu e rossi) e il rilievo archeologico.

4.2.1.5 AREA 6 – 7

Sempre nell'ambito del progetto Firb, gli archeologi dell'Università di Bari hanno effettuato una serie di ricognizioni che hanno interessato tutta l'area circostante al sito. In base alla quantità ed alla tipologia dei reperti archeologici individuati, si è ritenuto opportuno espandere la ricerca geofisica nei siti dove il rinvenimento si è dimostrato più consistente, al fine di programmare eventuali scavi futuri e ridurre i tempi e i costi di

ricerca. In particolare sono stati scelti due siti posizionati in direzione Sud rispetto al parco archeologico e indicati come *area 6* e *area 7* (Figura 4.36).

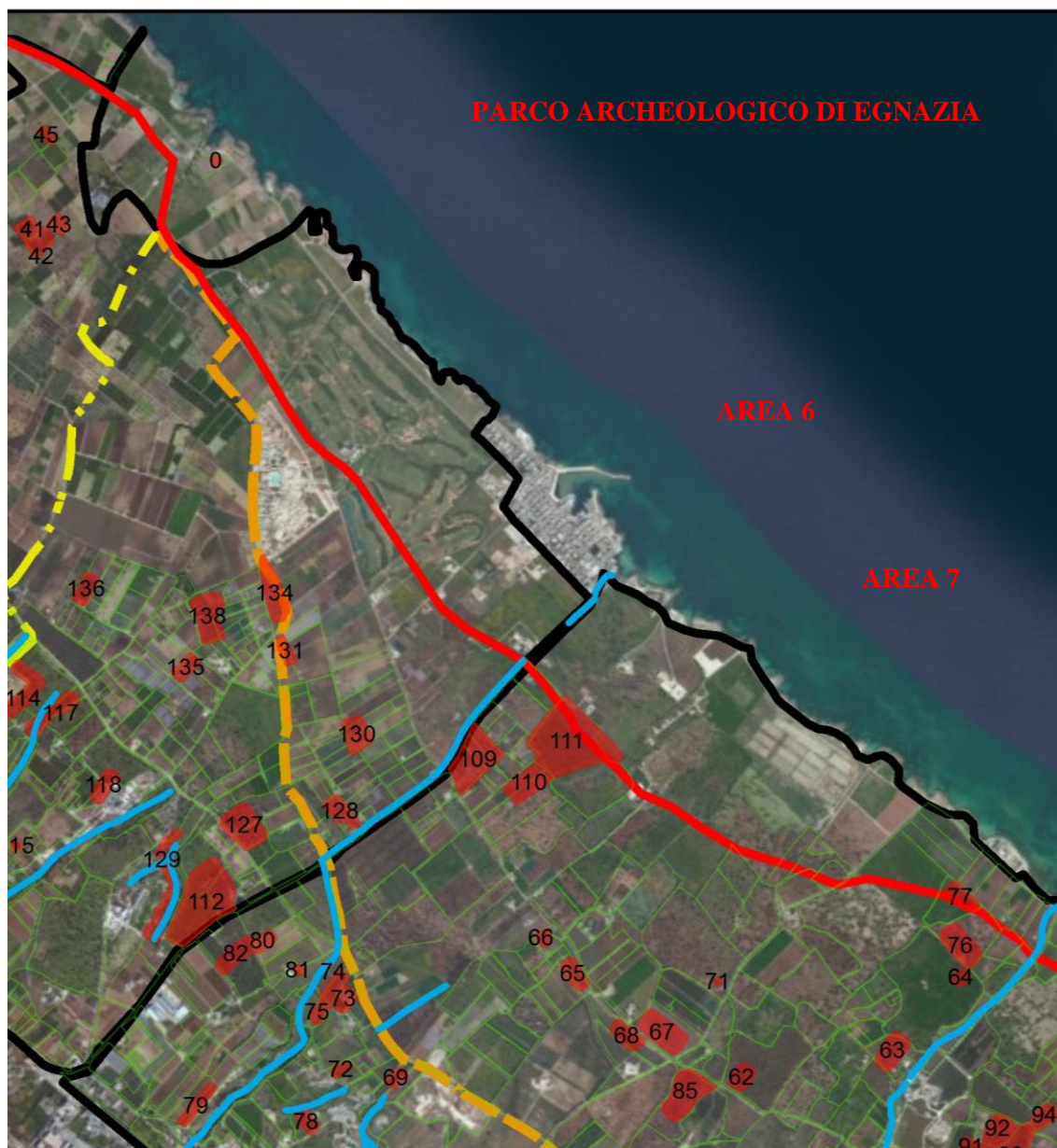


Figura 4.36 - Foto satellitare con indicazione dei siti soggetti a ricognizione e delle aree scelte per le prospezioni (foto concessa dall'Università di Bari).

I siti, indagati con profili paralleli posizionati ad una distanza variabile tra 1 ed 1.5m all'interno di una griglia di maglia regolare e con differenza elettrodica di 1m, hanno restituito delle tomografie di resistività che evidenziano forti anomalie alto-resistive e basso-resistive collocate ad 1m di profondità ma di natura differente.

Per l'area 6 (*Figura 4.37*) si evidenziano forti anomalie alto-resistive posizionate ai margini dell'areale di ricerca (in blu). Esse, nonostante la forma piuttosto regolare e considerando la natura del terreno circostante, si riferiscono con molta probabilità a banchi di roccia superficiali

Diverso è per l'area 7 (*Figura 4.38*) le anomalie alto-resistive presentano una forma più regolare (in rosso) lasciano supporre la presenza di strutture antropiche; al contrario le anomalie basso resistive (in blu) suggeriscono un possibile tracciato posto nel mezzo delle probabili strutture. Al di sopra della mappa tomografica sono state riportate le diverse interpretazioni del dato geofisico.

Anche per queste aree, in particolare per la 7, è stato suggerito un intervento diretto di scavo per approfondire lo studio effettuato, in modo da chiarire se i corpi sepolti che hanno generato tali anomalie siano di natura antropica oppure naturale.

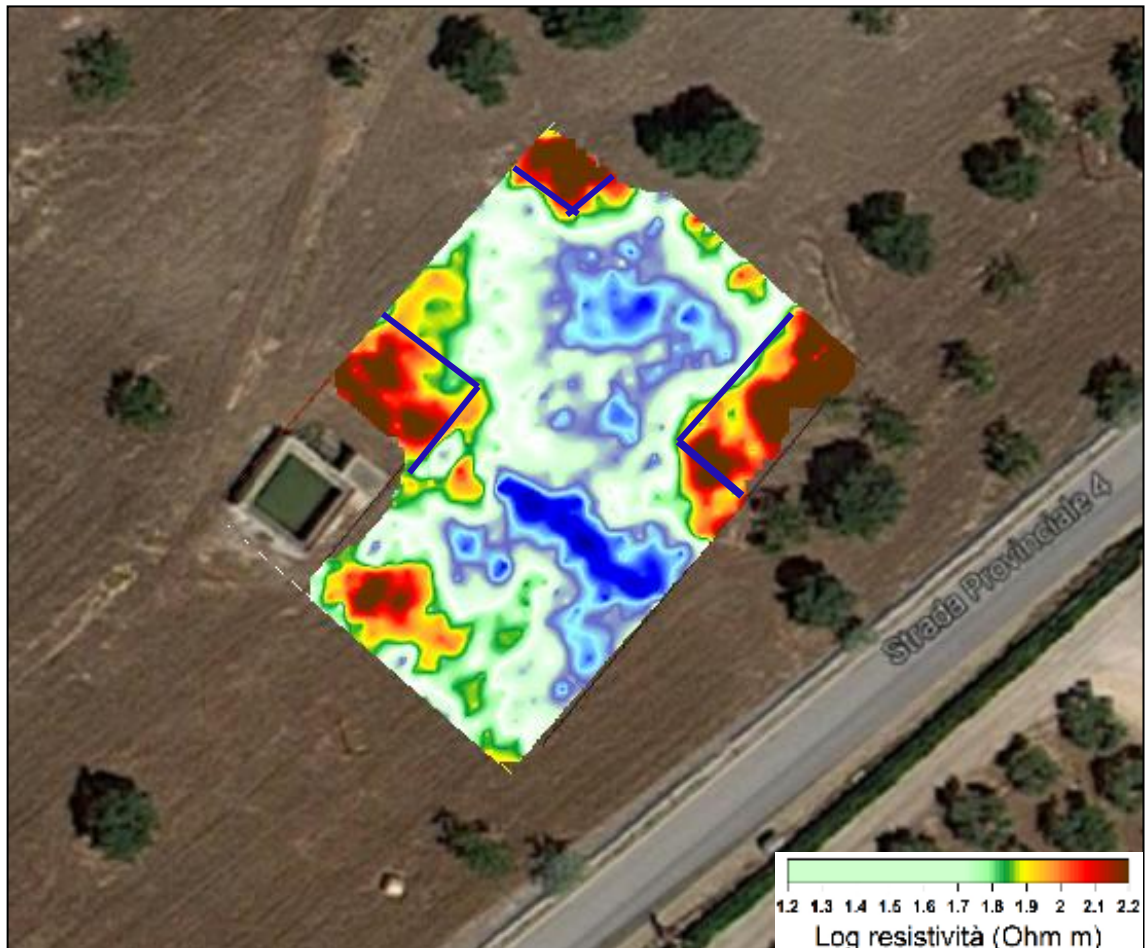


Figura 4.37 - Foto satellitare (da Google Earth) con i risultati delle prospezioni: i segmenti in blu indicano le anomalie alto-resistive inerenti probabilmente ai banchi di roccia.



Figura 4.38 - Foto satellitare (da Google Earth) con i risultati delle prospezioni: i segmenti in blu indicano le anomalie alto-resistive inerenti probabilmente a strutture antropiche, le linee tratteggiate rosse indicano il possibile tracciato.

4.3 IL RILIEVO TRAMITE LASER SCANNER E LA FOTOGRAMMETRIA: L'AREA CAMPIONE DELLE TERME DEL FORO

Accanto alla ricerca geofisica il lavoro sul campo ha previsto anche un rilievo tridimensionale dell'area delle terme tramite l'uso di due tecniche di rilevamento ad alta definizione.

La scelta di documentare solo questo ambiente è dettata dal fatto che esso rappresenta l'unico complesso scavato che ha conservato in maniera ottimale un certo numero di alzati, di particolare importanza storico-archeologico, oltre che un interessante impianto urbano facilmente leggibile (*Figura 4.39*).



Figura 4.39 - Foto area delle terme del foro (da CERAUDO G. 2014).

4.3.1 ACQUISIZIONE DEI DATI

Come accennato nel capitolo 3, le strumentazioni adoperate sono due:

1. il laser scanning tridimensionale (FOCUS3D della FARO)
2. la fotogrammetria digitale (CANON EOS 5D MARK II)

Per quanto riguarda il rilievo tramite laser scanning, considerando che il complesso presenta alzati molto articolati, è stata necessaria la predisposizione di 27 stazioni, 12 a terra e 15 lungo la passerella, distribuite in modo da scansionare più o meno frontalmente e dall'alto le strutture presenti (*Figura 4.40*).

Considerando la morfologia irregolare dei vari piani di calpestio, il posizionamento dello strumento è stato regolato di volta in volta grazie alla bolla elettronica interna al laser scanner e dal supporto stesso della macchina, consistente in un treppiede regolabile con base dotata di controllo tramite bolla sferica. Inoltre, è stato ritenuto opportuno usufruire di specifici bersagli di riferimento utili per l'aggancio delle scansioni durante il processo di rielaborazione digitale (*Figura 4.41*). Questi consistono in cinque sfere bianche, con riflettanza molto alta, disposte sul parapetto della passerella rialzata che corre lungo il perimetro dello spazio termale. In questo modo, spostando

solo due sfere in base alle esigenze, da ogni coppia di scansione contigue risulteranno visibili un minimo di tre sfere omologhe. Una volta acquisite tutte le scansioni si è proceduto con l'elaborazione dei dati (per i processi di rielaborazione si veda Cap. 3). Nonostante siano stati impiegati tempi molto lunghi per la restituzione del prodotto finale, e una serie di passaggi molto complessi che hanno richiesto una certa preparazione tecnica, a causa della complessa articolazione delle strutture, il modello finale ha presentato delle lacune (*Figura 4.42*).

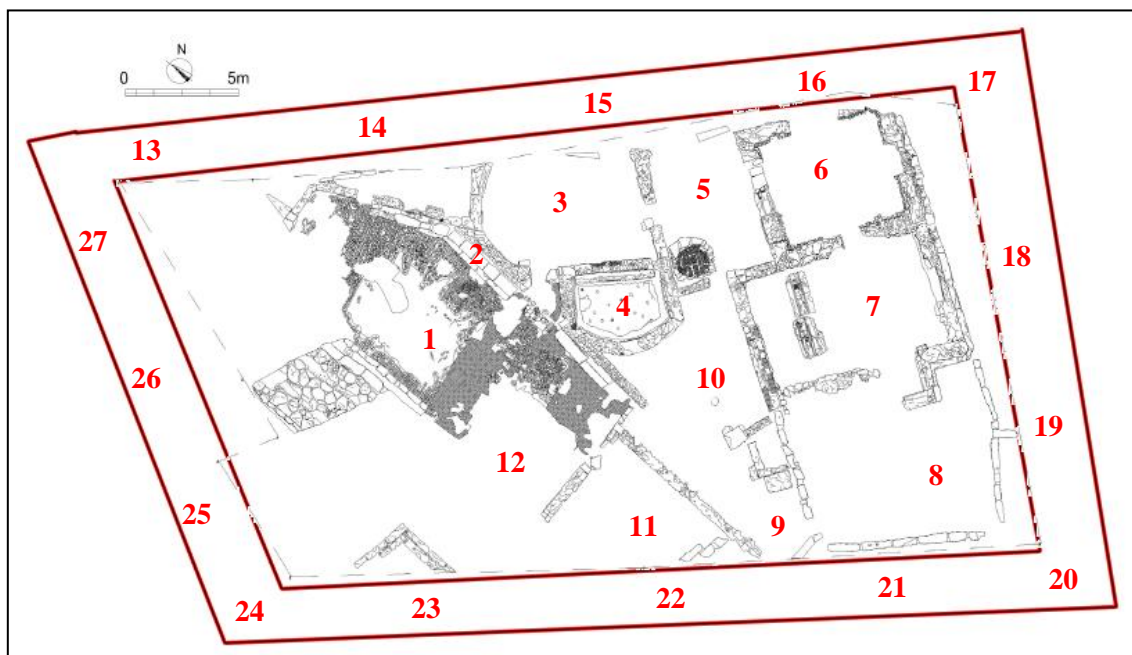


Figura 4.40 - Planimetria delle terme con indicazione delle stazioni; il perimetro rosso indica la passerella (immagine modificata da Cassano 2009).



Figura 4.41 – Esempio di disposizione delle sfere durante l'acquisizione delle scansioni.

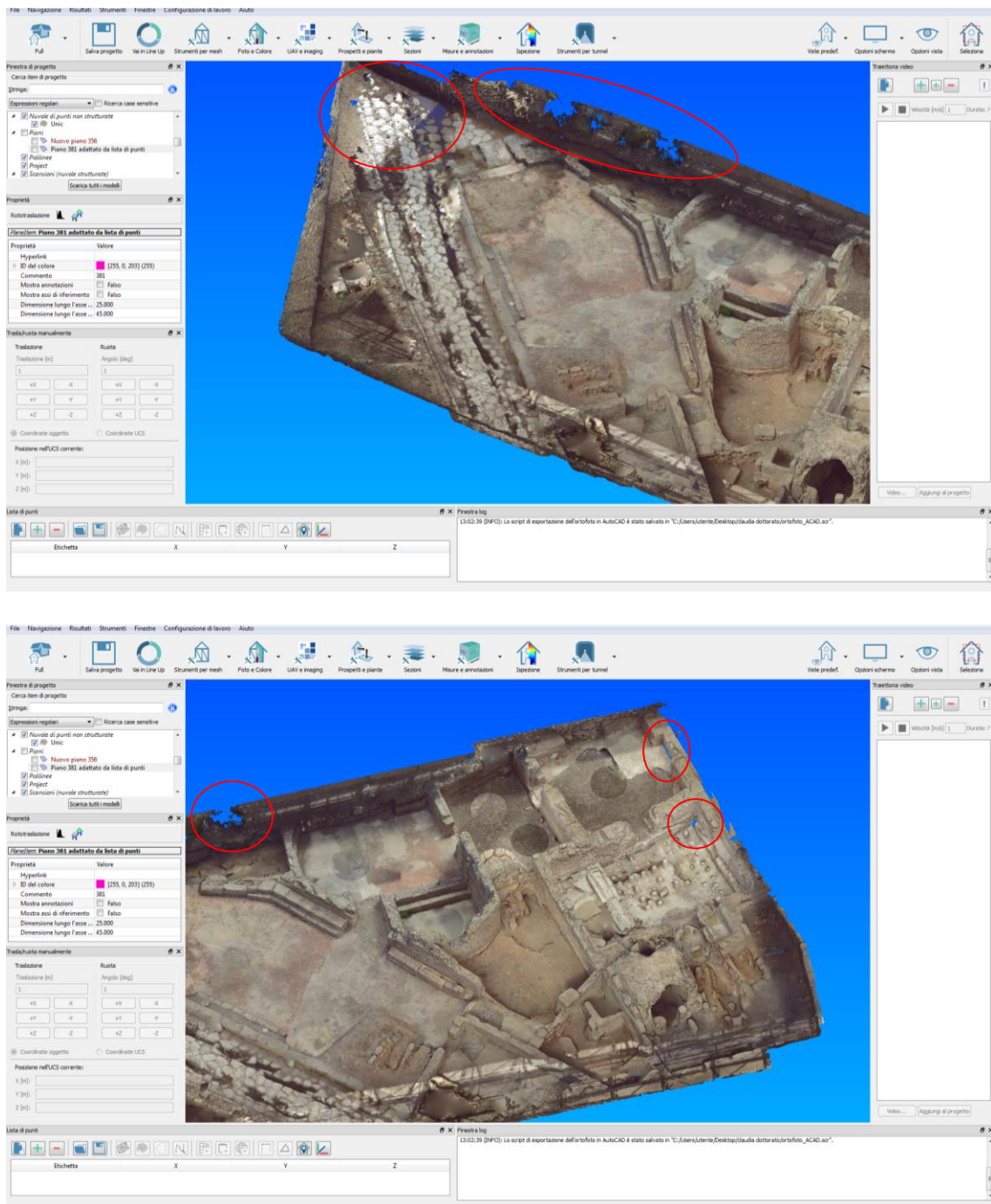


Figura 4.42 – Viste diverse del modello dopo la creazione della texture; in rosso sono cerchiare le zone dove sono presenti le lacune: in questo caso sono dei vuoti nelle superfici in corrispondenza dei quali è evidente il blu dello sfondo.

Dal momento che i raggi laser non riescono a raggiungere ogni singolo punto (a causa per esempio dei coni d'ombra, della presenza di ostacoli in primo piano o di zone eccessivamente scure) non sempre i dati sono completi; queste lacune nel modello compaiono come zone vuote.

Per ottenere modelli tridimensionali ancora più rispondenti alla realtà e colmare tali mancanze, è stato integrato il rilievo laser con la fotogrammetria digitale.

Nel rilevare il complesso termale con la camera metrica sono state necessarie 47 punti di presa. Le fotografie sono state scattate percorrendo in senso orario tutta la passerella che circonda l'area termale, partendo dall'angolo nord-ovest dello scavo come indicato in *Figura 4.43* (il pallino verde indica il punto in cui sono state scattate la prima ed ultima fotografia). La necessità di effettuare un elevato numero di scatti è dettata da due motivi principali: garantire una copertura completa delle strutture e perché ogni foto, in fase di autocorrelazione, deve presentare dei punti omologhi con la successiva immagine per sovrapporsi di almeno il 70% (*Figura 4.44*) e permettere l'aggancio tra le stesse. Ovviamente a questi fattori bisogna aggiungere il fatto che per una buona restituzione del modello (con una certa qualità di risoluzione) è importante avere a disposizione quanti più scatti possibili del soggetto studiato.

Il prodotto finale del montaggio delle fotogrammetrie, è un modello tridimensionale che viene applicato sul modello della nuvola di punti (per i processi di elaborazione e di integrazione dei modelli si veda il Cap. 3) (*Figura 4.45*).



Figura 4.43 - Planimetria delle termale: l perimetro rosso indica la passerella, le frecce verdi il percorso effettuato per le prese fotogrammetriche (immagine modificata da Cassano 2009).



Figura 4.44 - Esempi di fotogrammi per la restituzione del modello fotogrammetrico



Figura 4.45 - Immagine relativa alla restituzione del modello finale.

4.3.2 ELABORATI

Frutto di questa integrazione è stato un modello 3D che ha permesso di documentare e ricostruire virtualmente il complesso termale con tutte le sue stratigrafie ancora visibili, e dal quale è stato possibile estrarre piante, sezioni e ortofoto di qualsiasi alzata o dell'intero impianto.

Nello specifico la restituzione vettoriale di piante e sezioni ha richiesto diversi processi: Con il programma JRC 3D Reconstructor, sono stati creati dei piani che hanno tagliato in orizzontale (per le piante) (*Figura 4.46*) e in verticale (per le sezioni) (*Figura 4.47*) il modello tridimensionale, producendo così dei profili di sezione a determinate quote o distanze; ovviamente per ottenere una restituzione quanto più precisa possibile, il piano di taglio è stato disposto in maniera perfettamente parallela o perpendicolare al soggetto.

Le informazioni sono state poi esportate in formato *.dxf per gestirle in ambiente CAD. In questo modo è stato possibile ricostruire manualmente la geometria degli oggetti seguendo le discontinuità rilevate dal piano (*Figura 4.48*).

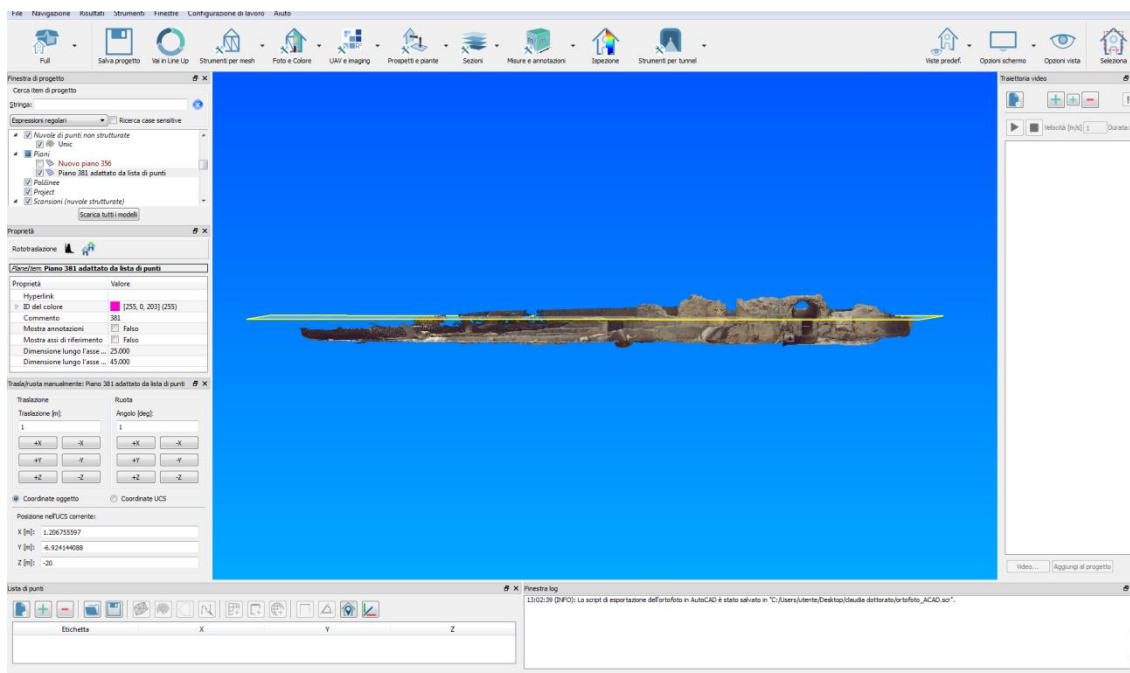


Figura 4.46 - Modello 3D con l'applicazione del piano orizzontale.

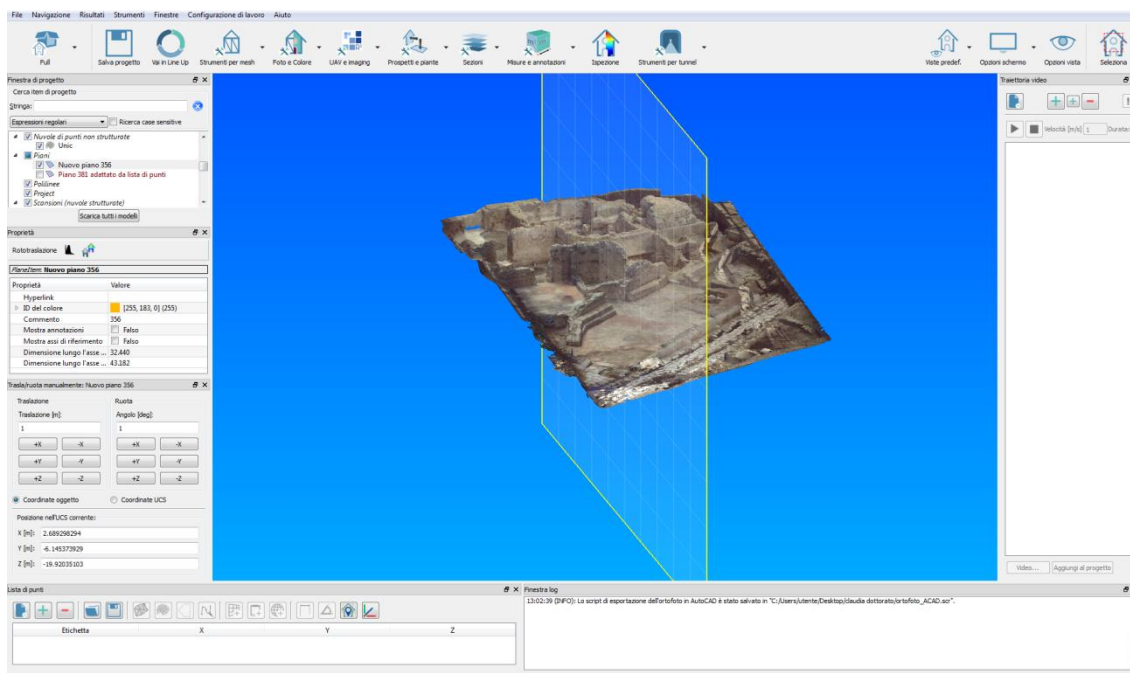


Figura 4.47 - Modello 3D con l'applicazione del piano orizzontale.

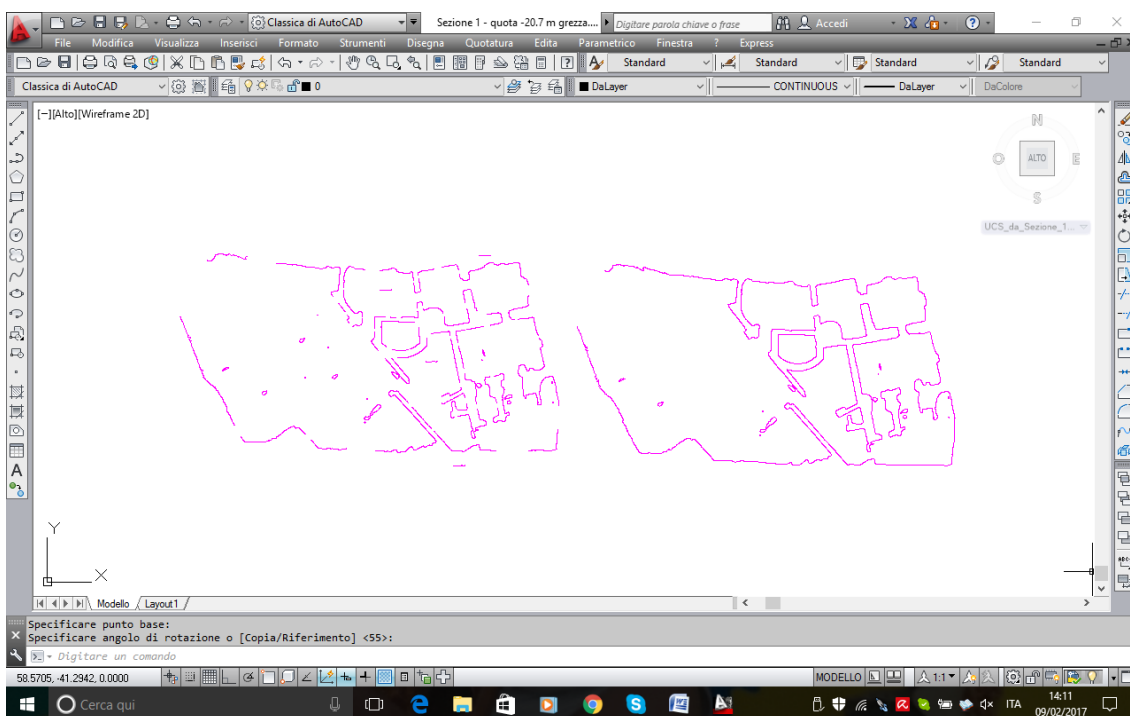


Figura 4.48 – Esempio del processo di ricostruzione: a sinistra la sezione orizzontale “grezza”, a destra la stessa sezione ricostruita e ripulita.

In particolare per le planimetrie, ottenute tagliando il modello ogni 0.40m partendo da quota +0.80m dal punto 0 del sistema di riferimento topografico inserito (Figura 4.49),

è stata effettuata un'integrazione delle sezioni con le informazioni raster per effettuare il processo di caratterizzazione (*Figure 4.50, 4.51, 4.52, 4.53*), dal momento che il piano di taglio individua solo il loro perimetro delle strutture e non i particolari del loro interno come accade in un rilievo archeologico (*Figura 4.54*). Per le sezioni, mentre, sono state restituite due prodotti diversi: quattro sezioni equi distanziate di 2m (*Figure 4.55, 4.56*) e tre sezioni-prospetto bidimensionali ricavate nei punti del modello in cui si sono evidenziate le strutture più interessanti (*Figura 4.57, 4.58*).

Le ortofoto vengono create sempre tramite un piano parallelo alla superficie interessata, al quale però si applica la funzione di camera ortografica. Una volta specificata la direzione di vista della camera virtuale e il numero dei pixel dell'immagine che si vuole produrre, il software effettua un raddrizzamento automatico e scatta l'ortofoto. In questo lavoro è stata creata l'ortofoto generale dell'intero complesso termale (*Figura 4.59*).

Nonostante il gran numero di prodotti che si possono ricavare da un unico modello tridimensionale, a volte essi non sono sufficienti a comunicare la totalità dei soggetti studiati. Per questo si è scelto di ricorrere alla terza dimensione per produrre delle rappresentazioni tridimensionali interattive, in modo da consentire e fornire uno strumento in più per una migliore e più immediata comprensione del volume con tutte le sue caratteristiche. Ciò è stato possibile tramite la creazione di una traiettoria video all'interno dell'interfaccia tridimensionale; questo passaggio consiste nel creare delle camere virtuali lungo in "percorso desiderato" per poi raccordarle in successione.

I risultati sono un editing video e un'elaborazione fotogrammetrica delle immagini digitali che genera dati spaziali 3D visualizzabili in formato PDF (si veda CD in allegato). Questi elaborati potranno essere utilizzati in applicazioni GIS, nella documentazione dei beni culturali, per produrre degli effetti visivi e quindi prodotti interattivi utili per la divulgazione e la didattica del bene culturale, per effettuare misure indirette di oggetti di varie scale e altro ancora.

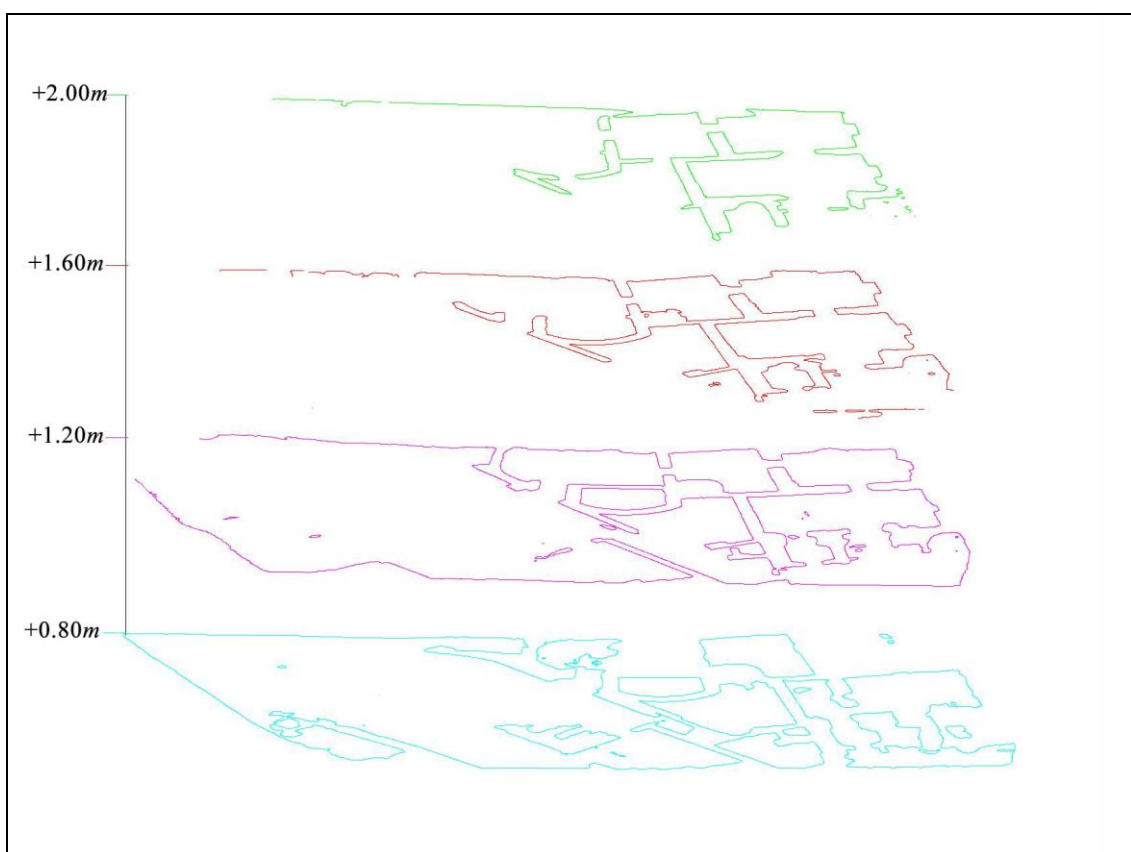
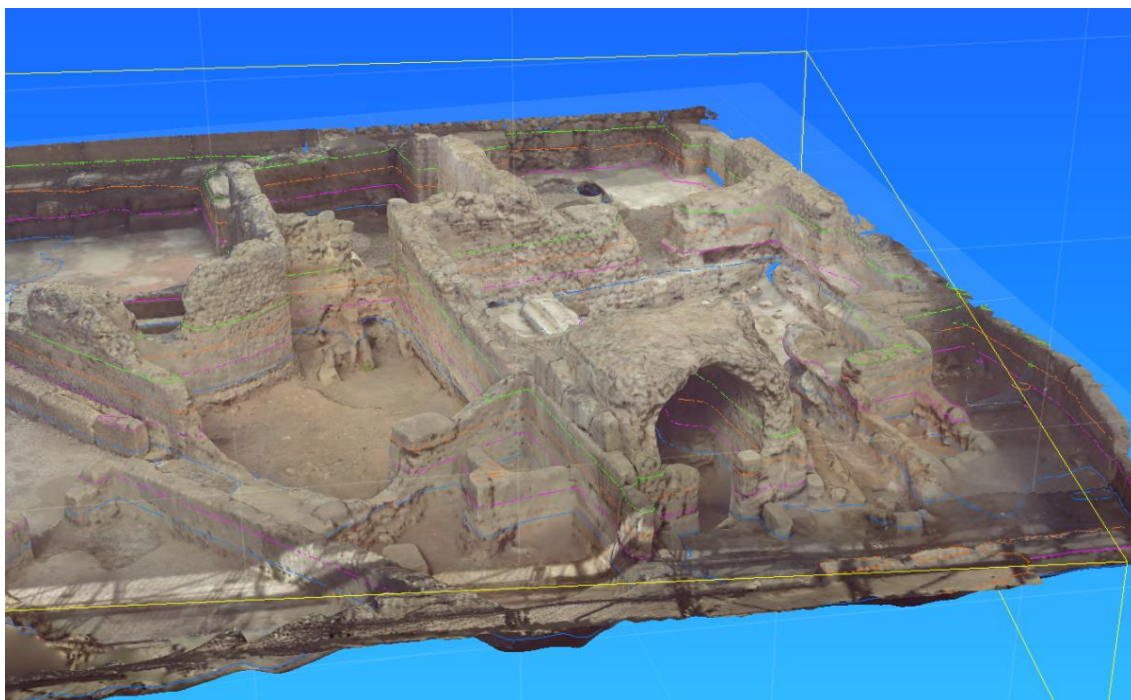


Figura 4.49 – In alto: particolare delle terme con l'indicazione delle quote dove sono stati effettuati i tagli orizzontali (linee colorate); in basso: vista tridimensionale delle planimetrie posizionate a quote differenti e ricavate partendo da quota +0.80m dal punto 0 del sistema di riferimento topografico inserito nel modello.

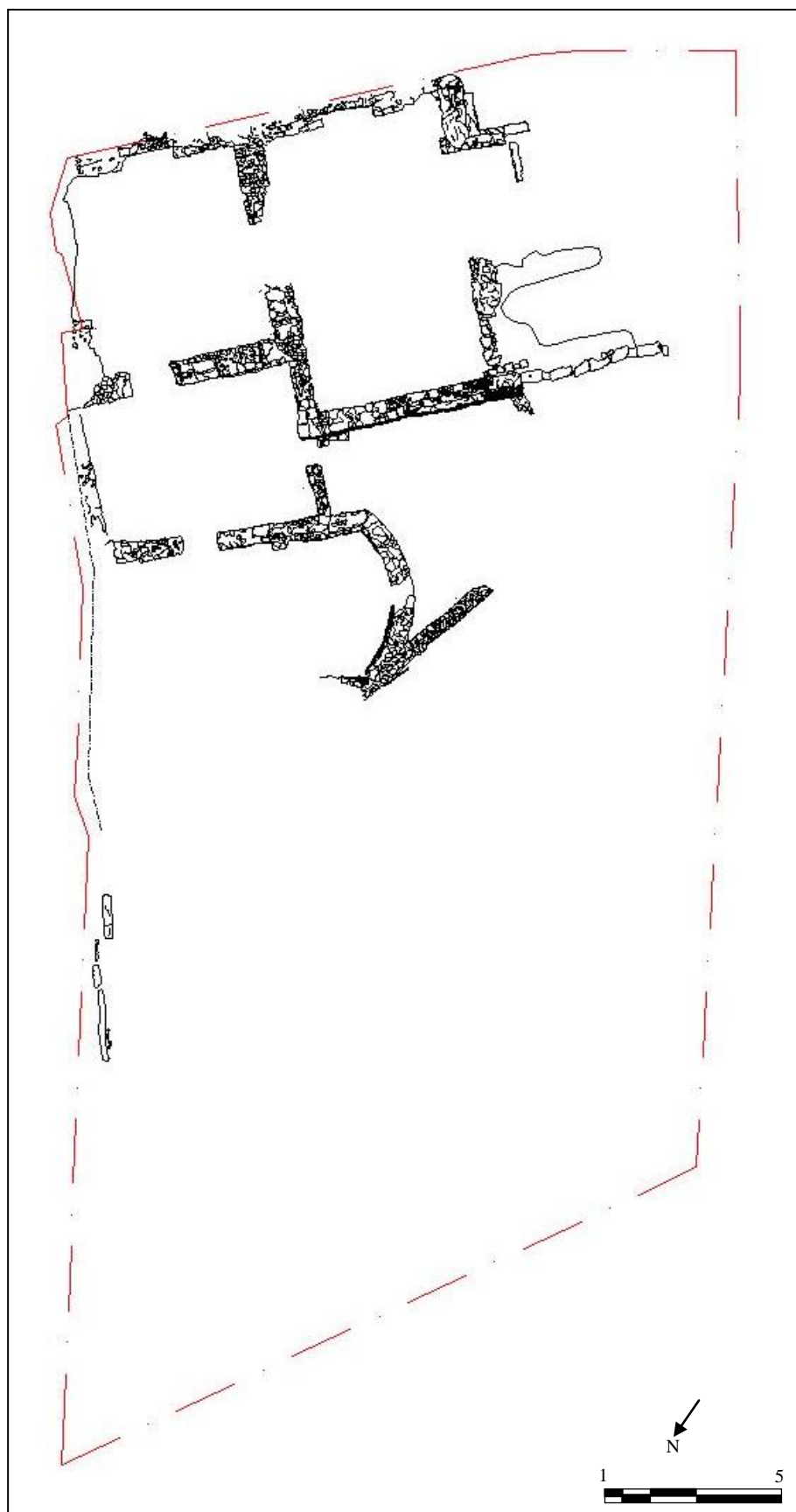


Figura 4.50 – Planimetria ricavata a quota +2.00m con la caratterizzazione delle strutture.

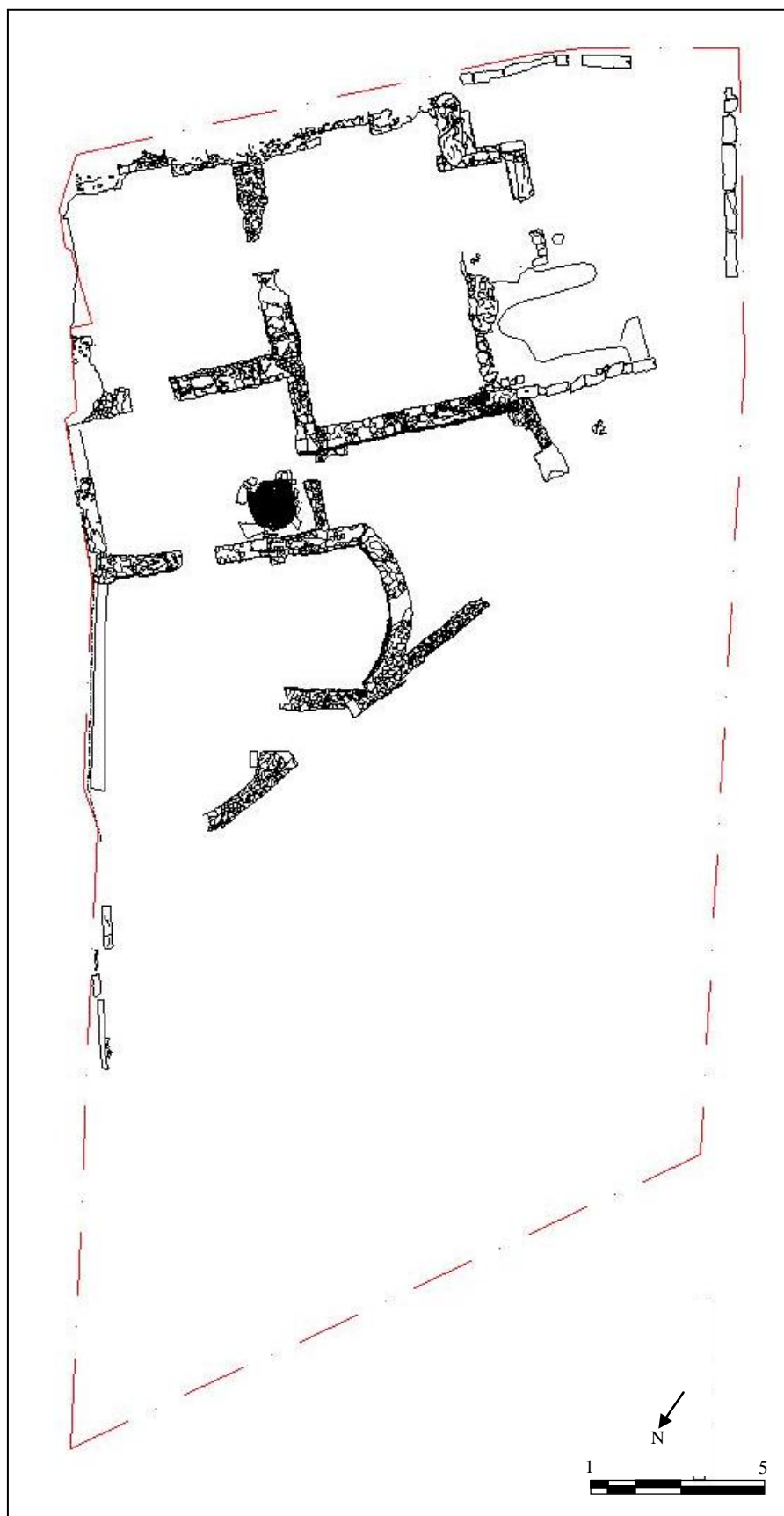


Figura 4.51 – Planimetria ricavata a quota +1.60m con la caratterizzazione delle strutture.

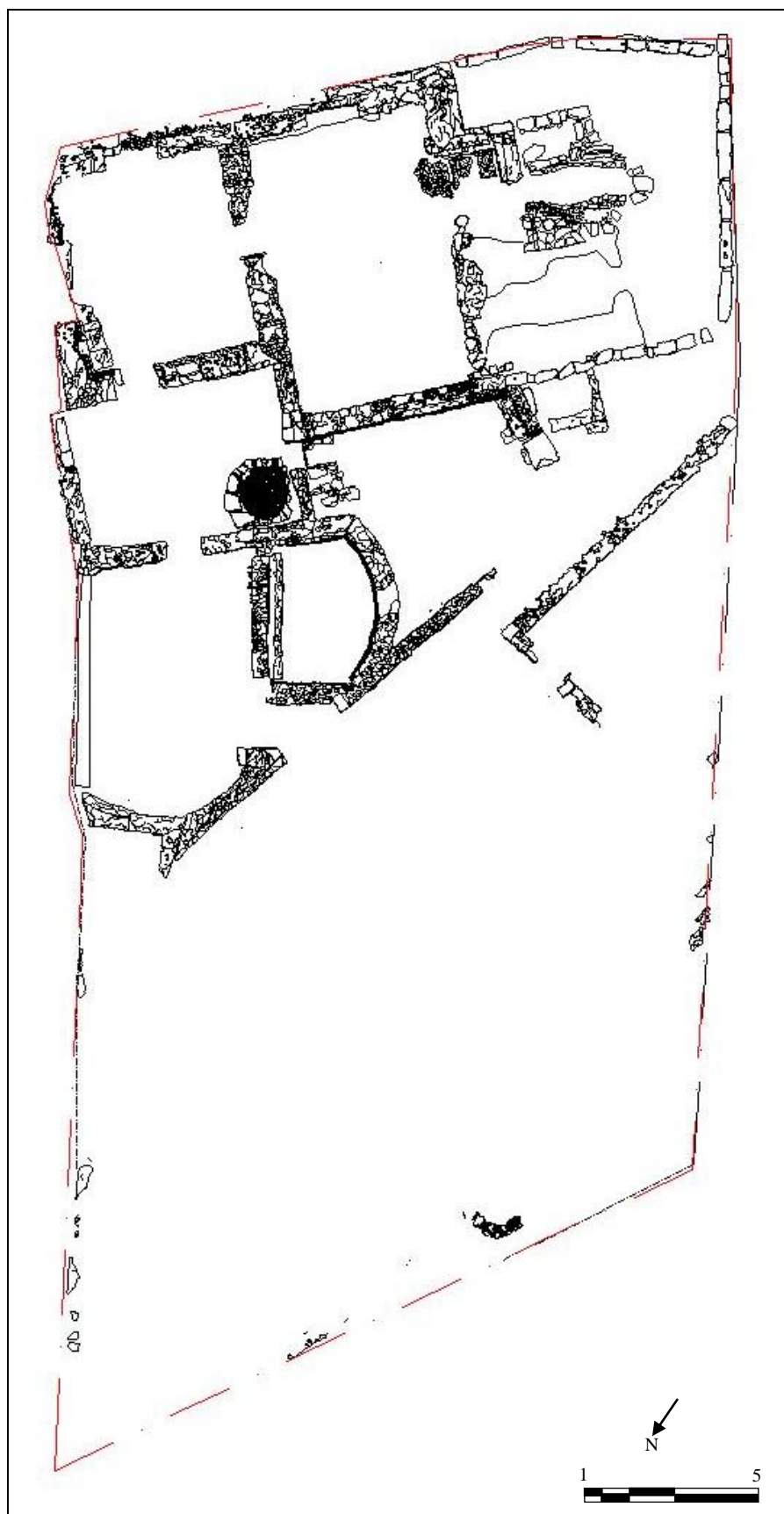


Figura 4.52 – Planimetria ricavata a quota +1.20m con la caratterizzazione delle strutture.

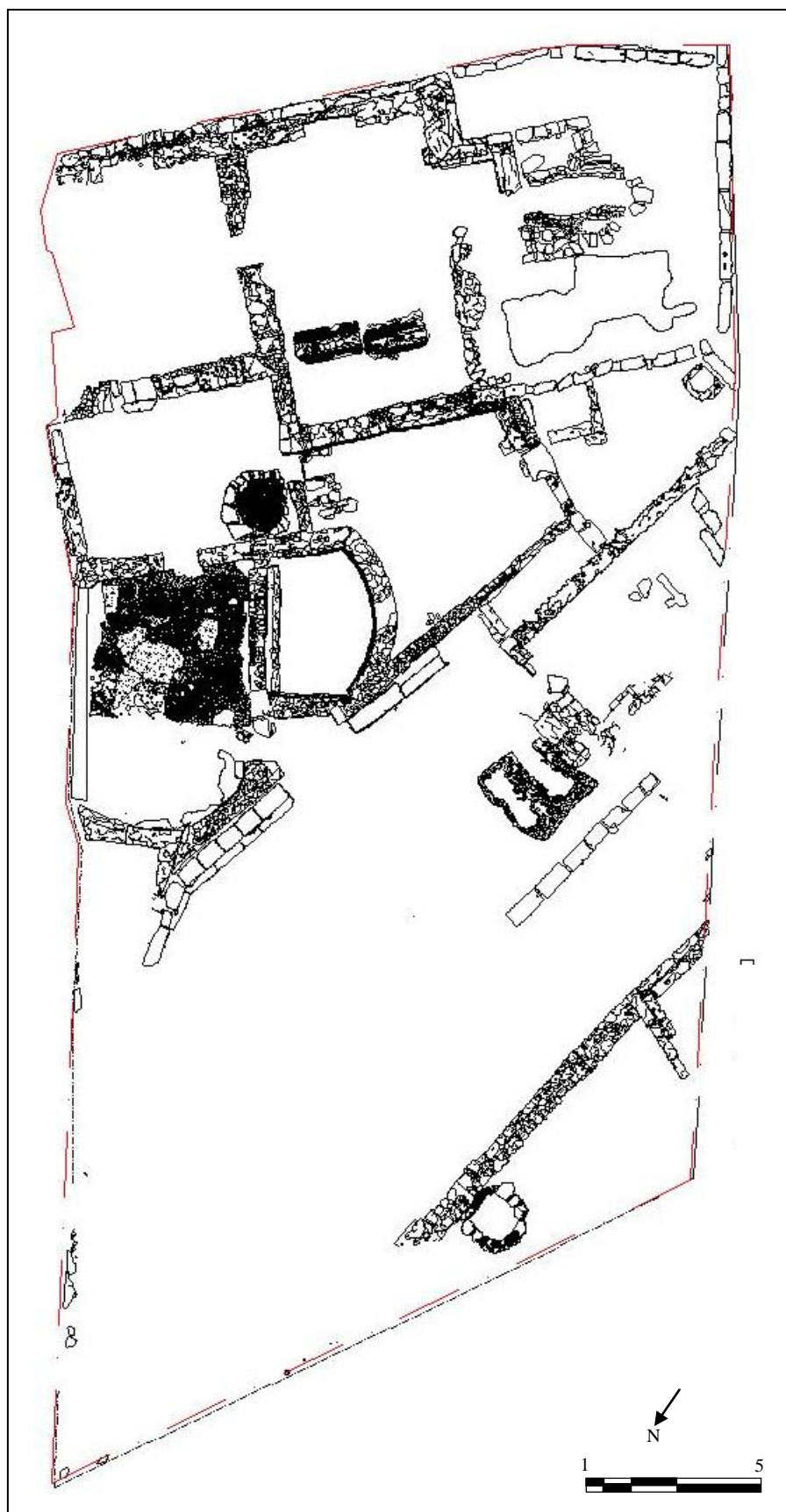


Figura 4.53 – Planimetria ricavata a quota +0.80m con la caratterizzazione delle strutture.

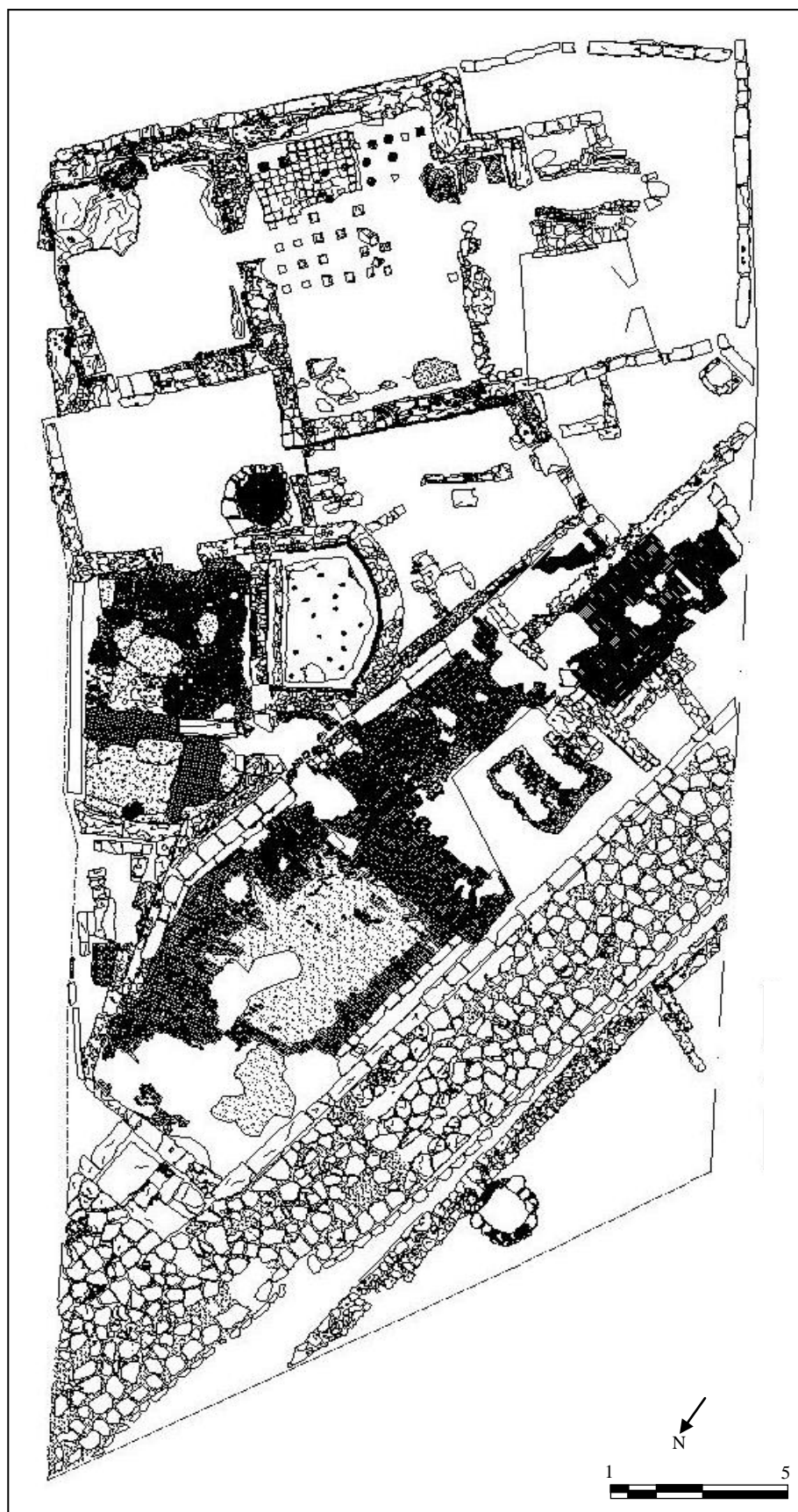


Figura 4.54 – Planimetria relativa a quota 0 (gentilmente concessa dalla Prof.ssa Cassano)

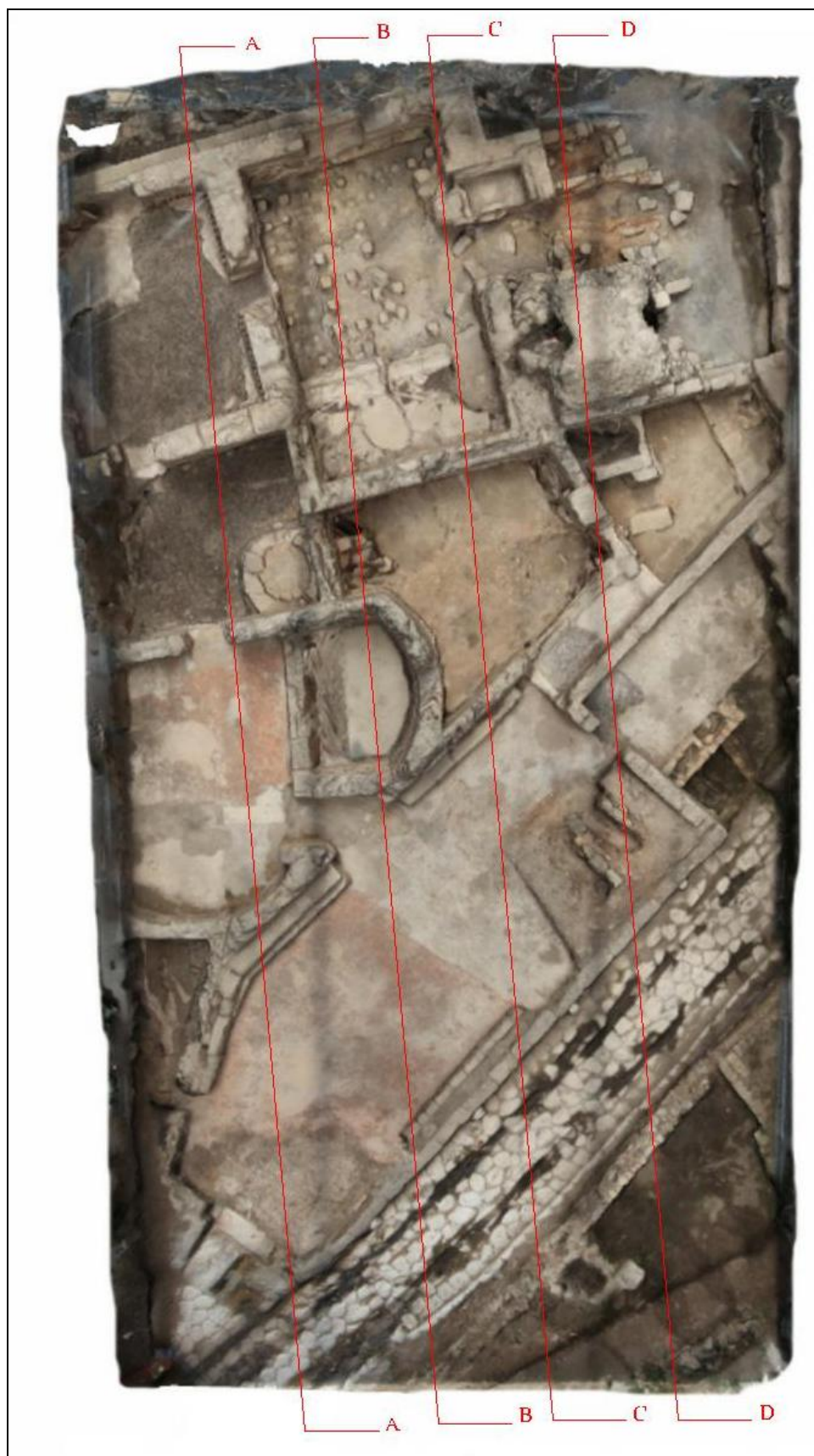


Figura 4.55 – Ortofoto con l'indicazione dei tagli di sezione.

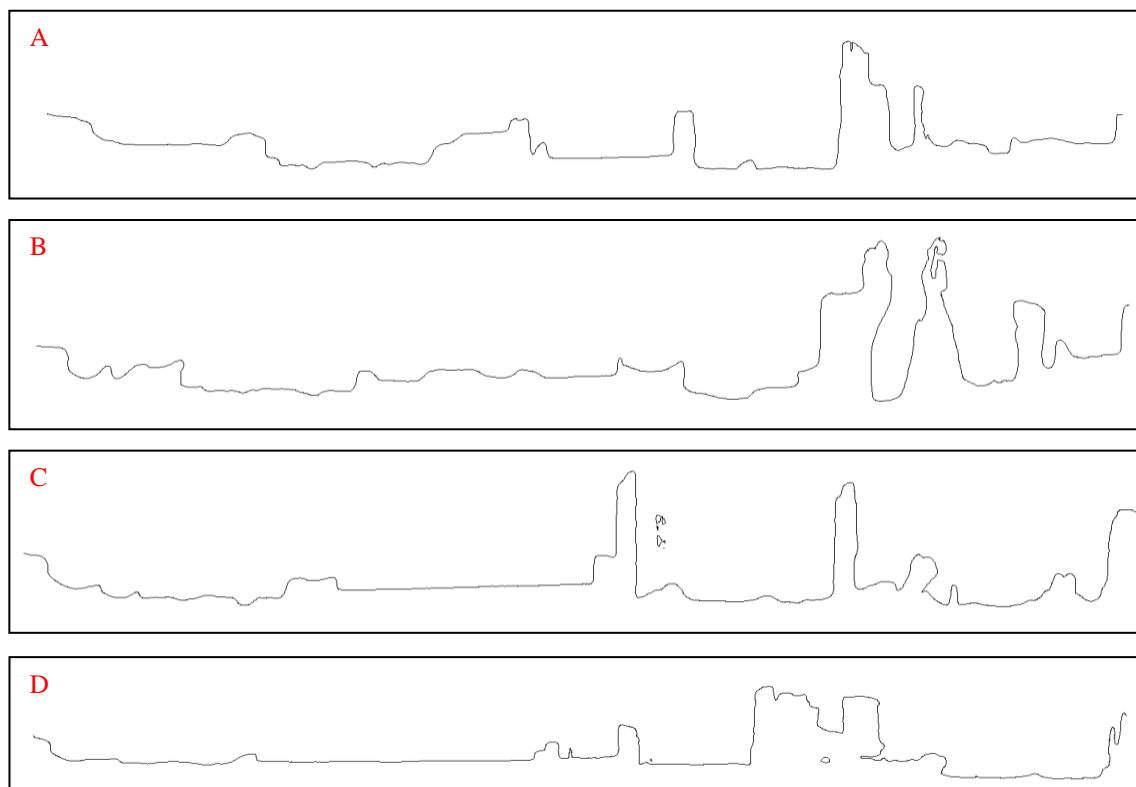


Figura 4.56 – Profili delle sezioni.

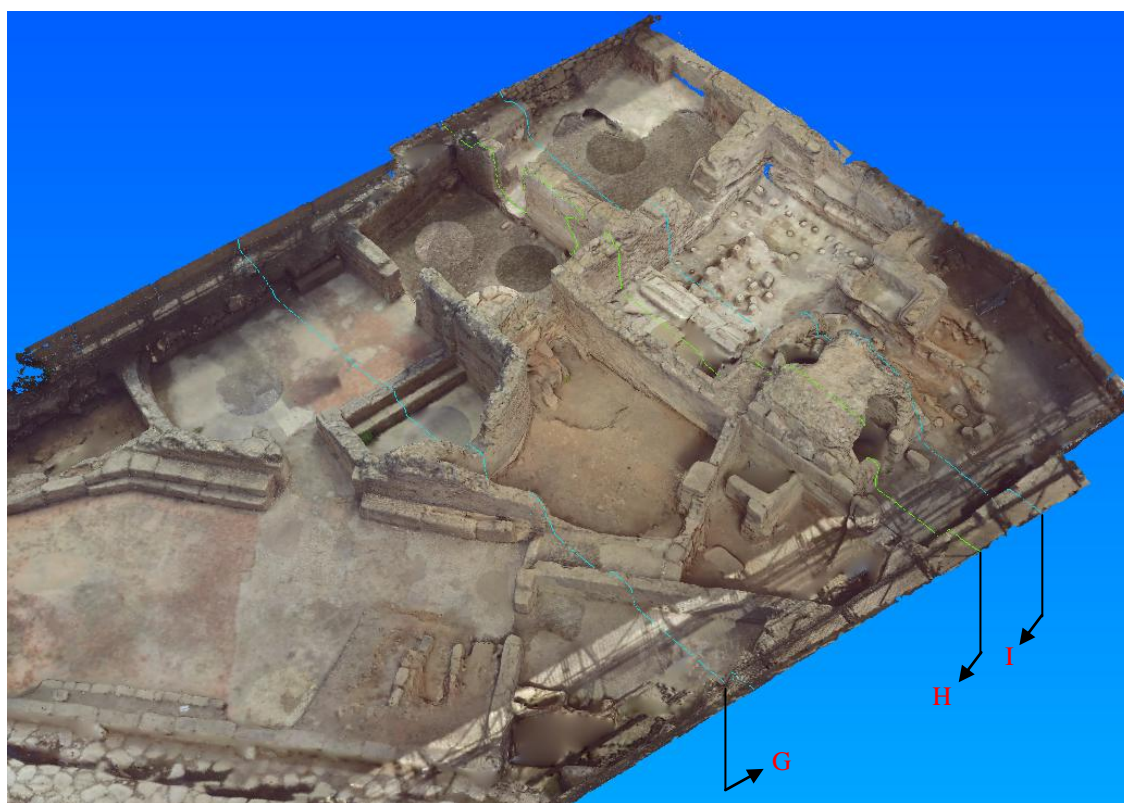


Figura 4.57 – Particolare delle terme con indicazione dei tagli delle sezioni-prospetto: in base all'articolazione delle strutture si è deciso di orientare la vista del piano.

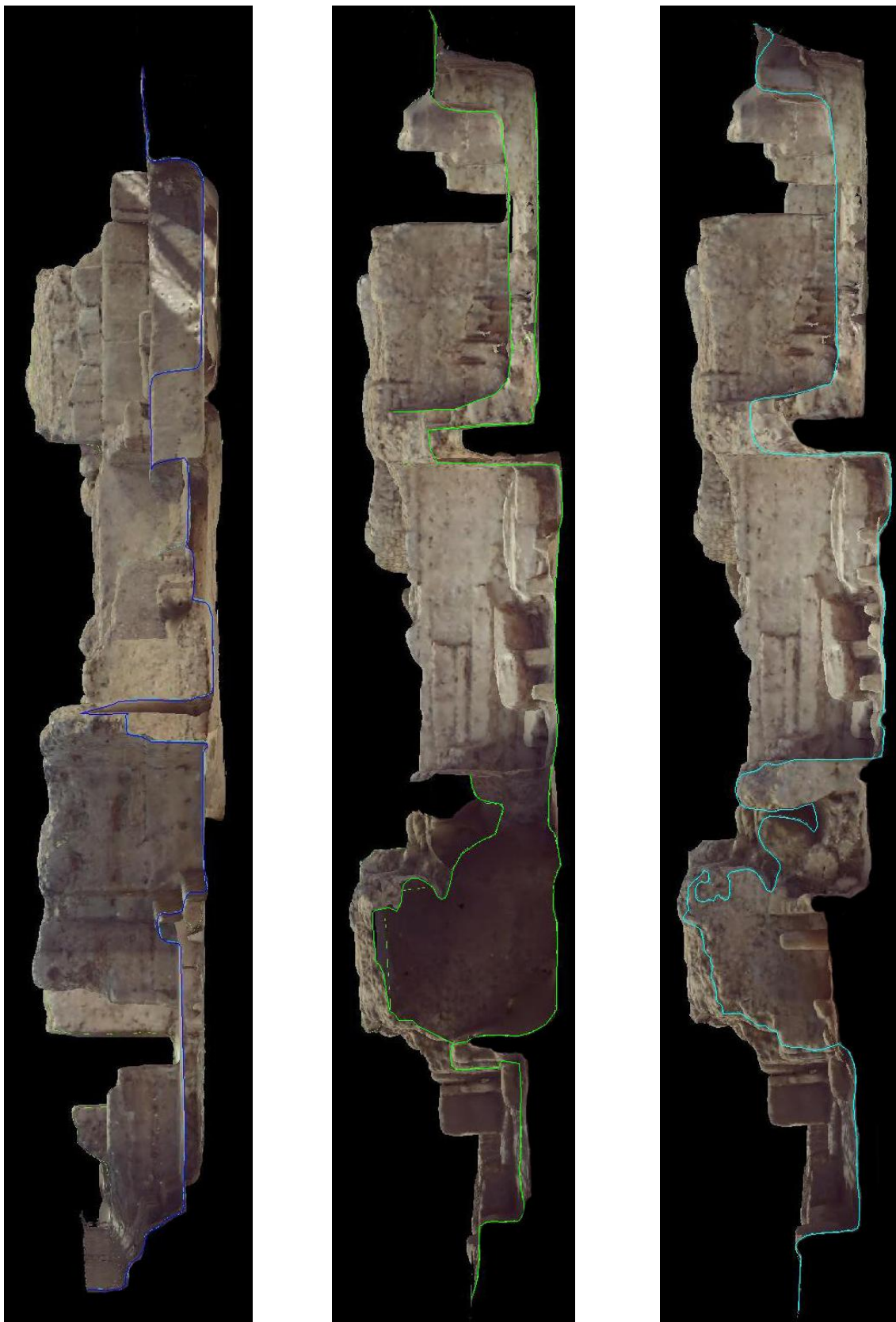


Figura 4.58 – Sezioni-prospetto: le linee colorate indicano i punti intercettati dal piano di taglio: da sinistra G, H, I.



Figura 4.59 – In alto la foto area delle terme (da CERAUDO G. 2014); in basso l'ortofoto del complesso restituita con JRC 3D Reconstructor.

Capitolo 5 – Esempi di applicazioni per la tutela del patrimonio culturale

La necessità di disporre di beni reali su cui sperimentare le diverse tecniche e tecnologie soprattutto di natura geofisica, è nata dalla natura stessa della ricerca descritta, che è prettamente applicata.

Questo è il motivo principale della mia collaborazione con la Prof.ssa Marilena Cozzolino (Università degli Studi del Molise), una collaborazione grazie alla quale durante i tre anni di dottorato mi ha dato l'opportunità di partecipare a vari progetti di ricerca inerenti le applicazioni delle diverse metodologie geofisiche al servizio di indagini archeologiche e non solo, commissionati da enti privati e pubblici, al fine di contribuire alla conoscenza, valorizzazione, conservazione e tutela del bene in esame.

E' però importante sottolineare che le problematiche caratteristiche di ogni caso affrontato, hanno spinto all'esigenza di trovare soluzioni specifiche che hanno indirizzato e in qualche modo definito la ricerca stessa. In quest'ottica, dunque, ho potuto attestare le possibili applicazioni di metodologie geofisiche e le relative rielaborazioni dei dati acquisiti, in modo da constatare e comprendere il principio di funzionamento, il tipo di strumentazione implicata nella misura, il tipo di risposta che fornisce, le profondità di investigazione raggiungibili e il campo di applicabilità. Considerando che ancora non esiste un metodo d'indagine geofisica esclusivamente pensato per una ricerca archeologica piuttosto che una geologica, è stato necessario scegliere di volta in volta il metodo di ricerca più adatto a quel determinato contesto, in base alle caratteristiche dell'area: la costituzione geolitologica dei terreni, la morfologia e l'uso del suolo, le condizioni logistiche e gli eventuali disturbi causati dalle infrastrutture dei centri abitati e industriali; al fine di ottenere dei risultati quanto più validi possibili, sono state confrontate le diverse modalità con le quali ottenere le varie sequenze di acquisizioni e talvolta sono state integrate e/o confrontate le diverse tecniche d'indagine geofisica¹⁴⁴.

Di seguito sono riportati alcuni dei casi studio presenti sul territorio, situazioni di ricerca diverse che rispecchiano quanto detto.

Il tipo di indagini geofisica è stata programmata in base alle condizioni logistiche dell'area e a quelle del terreno, al tipo di strutture archeologiche da individuare ed alla

¹⁴⁴ PIRO 2003.

profondità di investigazione da raggiungere; la strumentazione usata varia in relazione alla scelta del metodo.

5.1 CROTONE

Il lavoro è stato svolto in collaborazione con la Soprintendenza per i Beni Archeologici della Calabria, al fine di verificare la presenza di strutture archeologiche sepolte e supportare o meno la proposta di vincolo diretto avanzata dalla stessa Soprintendenza; la zona risultava già segnalata come di interesse archeologico in seguito a significativi rinvenimenti di frammenti ceramici e di laterizi. Per la tipologia del materiale rinvenuto, era stata ipotizzata la presenza di un'area sacra collegata al sito di Capo Colonna.

L'area in oggetto (*Figura 5.1*) occupa una superficie pianeggiante ed è situata sul lato meridionale del promontorio di Capo Colonna in loc. Torre Mariedda - Quote Cimino, a poche centinaia di metri dall'area dell'antico santuario.



Figura 5.1 - Foto aerea del sito con l'indicazione delle zone investigate (A – B) (Google-Earth).

L'area archeologica si estende lungo 30 ettari di terreno ed è situata a 10 km a sud di Crotone. La particolare forma del promontorio, protesa verso il mare con un leggero pendio, crea a nord un'insenatura che sin dall'antichità venne utilizzata come approdo sicuro e protetto dalle mareggiate. Tra le aree sacre più importanti ricordiamo il grande *Heraion Lakinion* del V secolo a.C. (il più noto dell'intero bacino del Mediterraneo e di cui oggi è visibile un'unica colonna) dedicato alla dea *Hera Lacinia*. Visibili sono

anche il *Katagogion* della seconda metà del IV secolo a.C., albergo per i pellegrini privilegiati, e l'*Hestiatorion*, edificio per i banchetti. La zona è ben protetta dall'ampia cortina muraria rinforzata a nord e a sud da due torri esterne. Non mancano tracce di diversi ambienti domestici (forse alloggi dei sacerdoti), dell'abitato romano della metà del II secolo a.C., un *balneum* termale di epoca romana, ed una villa romana entrambi del III secolo d.C.¹⁴⁵

Le prospezioni effettuate in due zone limitrofe, definite A e B (*Figura 5.2*), sono state condotte con il metodo geoelettrico adottando la disposizione dipolo-dipolo assiale.

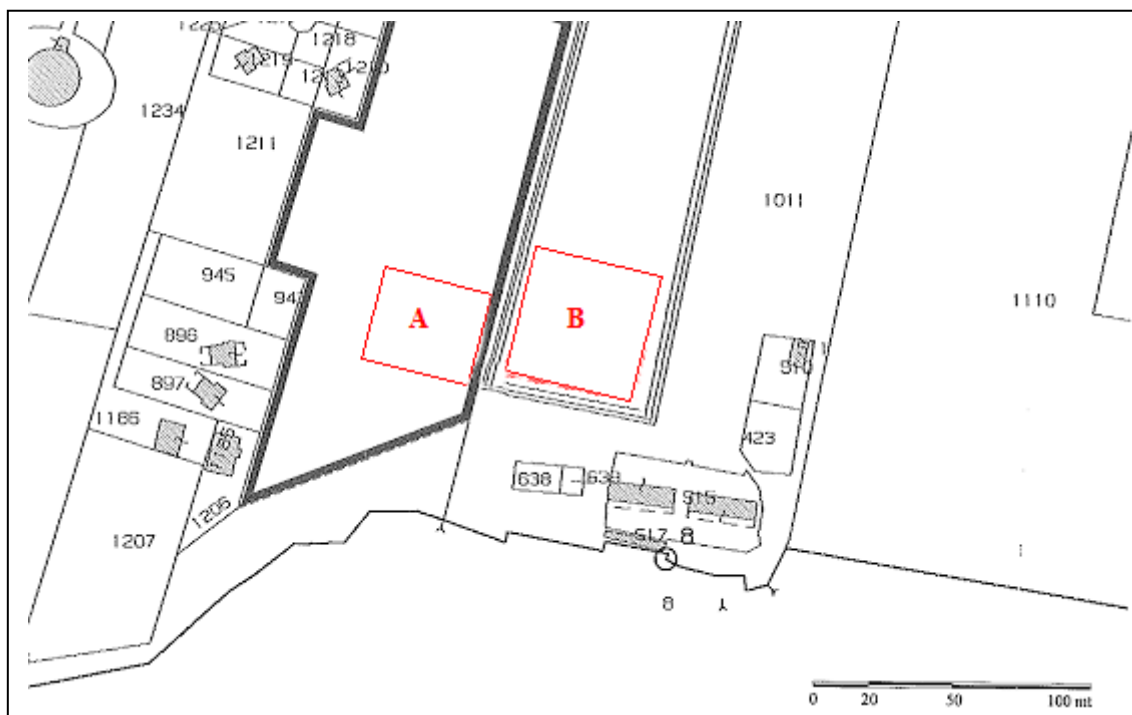


Figura 5.2 - Planimetria dell'area e localizzazione dei siti indagati.

La griglia di superficie è stata adattata alla logistica dell'area: i profili sono stati acquisiti su linee parallele distanti 1m e con lunghezza pressoché costante.

Nonostante entrambe le mappe di resistività abbiano evidenziato la presenza di numerose anomalie alto-resistive, la zona meno interessante è stata la B (*Figura 5.3*): la tomografia ha messo in evidenza delle anomalie alto-resistive (indicate con le frecce blu) posizionate ai lati di un'anomalia basso-resistiva (freccia rossa); la loro forma e articolazione non si sono rilevate soddisfacenti al fine di suggerire interventi di scavo

¹⁴⁵ Ministero dei Beni e delle Attività Culturali e del Turismo - CulturaItalia Versione 2.0

diretti per verificare la natura stessa delle anomalie, per le quali è stata proposta un'ipotesi che si tratti di corpi sepolti di origine naturale (come accumuli di pietre) piuttosto che antropica.

Diversa si è dimostrata la tomografia della zona A (*Figura 5.3*) che ha messo in evidenza la presenza di ipotetiche strutture antropiche. Le anomalie alto-resistive (evidenziate con segmenti in blu) sembrano avere una forma piuttosto lineare, il che ha fatto escludere l'ipotesi di un allineamento casuale di pietre o banchi di roccia.

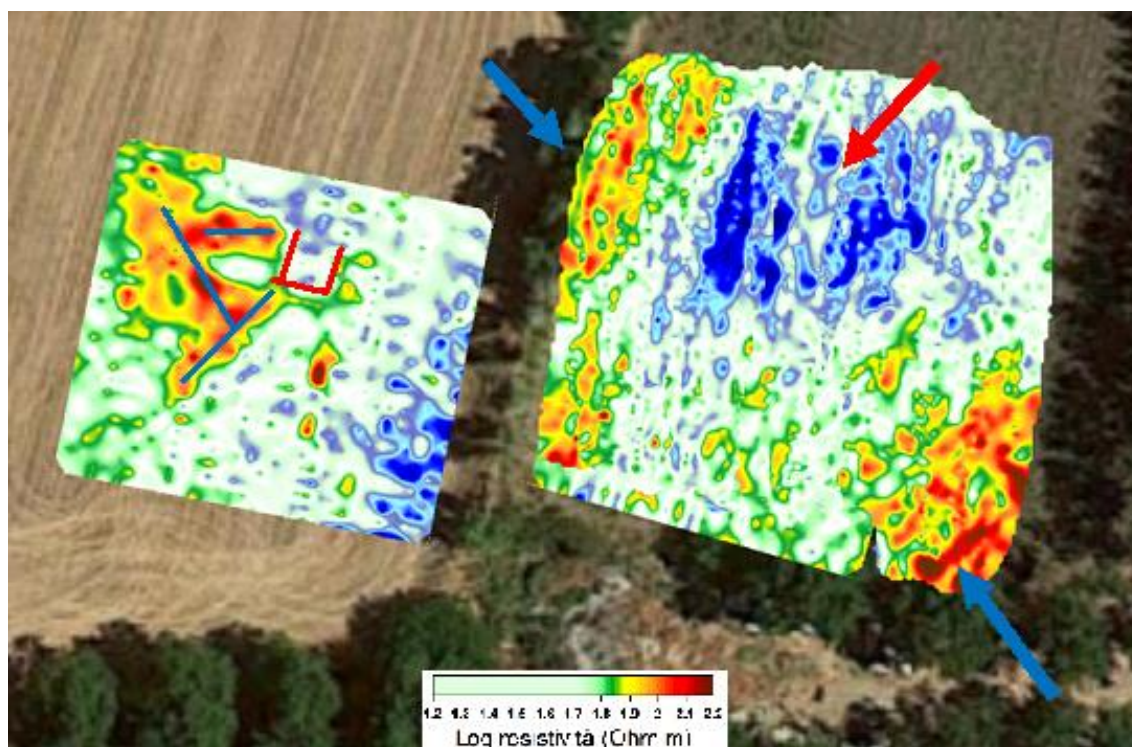


Figura 5.3 - Foto aeree (Google Earth) con sovrapposizione delle mappe tomografiche e interpretazione delle anomalie.

In base ai risultati ottimali la Soprintendenza ha condotto un saggio di scavo nella zona A (*Figura 5.4*) di circa 13m x 10m che hanno confermato la presenza di strutture antropiche. Sono stati portati in luce i resti di una struttura riferibile con ogni probabilità ad una fontana monumentale, delimitata da due canalette di adduzione dell'acqua all'interno di una vasca (nella figura indicata con segmenti rossi).

A circa 8 m dal primo saggio, è stato condotto un secondo scavo più piccolo (5m x 5m) che ha messo in luce tracce di un ambiente destinato alla lavorazione della ceramica.



Figura 5.4 - Foto del saggio di scavo tratta dal decreto n. 6 del 20/01/2016 del Ministero dei Beni e delle Attività Culturali e del Turismo Segretariato Regionale per la Calabria.

5.2 CISTERNA DI LATINA – SITO ARCHEOLOGICO DI TRES TABERNAE

Le indagini geofisiche sono state svolte in collaborazione con la Soprintendenza Archeologica del Lazio, al fine di accertare la presenza di strutture archeologiche ancora sepolte nel sottosuolo e, dunque, ipotizzare l'estensione dell'insediamento e della *statio*. L'area in oggetto (Figura 5.5) occupa una superficie pianeggiante ed è posizionata tra i due settore dello scavo archeologico e la via Appia, estendendosi ad est del medesimo scavo.

La *statio* di *Tres Tabernae* è compresa nel territorio comunale di Cisterna di Latina ed è situata lungo il tracciato della via Appia (Figura 5.6).

Il sito archeologico si sviluppa su un'area di circa 2.500 mq: l'insediamento copre un arco cronologico che va dal I e il IX secolo d.C. Questa importante stazione di posta sull'Appia, successivamente diventata *civitas*, è ricordata dalle fonti letterarie e storiche (come *Forum Appii*): nel 60 d.C. l'apostolo San Paolo condotto in catene verso Roma



Figura 5.5 - Foto aerea del sito con l'indicazione della zona investigata (Google Earth).



Figura 5.6 Particolare delle strutture emerse durante lo scavo archeologico

incontrò un gruppo di fedeli provenienti dalla capitale dell'Impero. Intorno alla stazione si sviluppò un piccolo centro abitato, che divenne sede episcopale nel 313 d.C. e rimase tale fino al IX secolo. Le indagini archeologiche hanno messo in luce un diverticolo dell'Appia, dotato di marciapiedi e di uno slargo utile alla manovra dei carri, su cui si affacciano una serie di edifici cronologicamente differenti e di carattere pubblico e privato. Tra i resti si riconosce un piccolo *balneum*, un pozzo in opera reticolata e una grande cisterna. Non mancano una serie di vani pavimentati con mosaico alternati a spazi aperti. Del II secolo d.C. sono tre ambienti contigui pavimentati con mosaici

bianco-neri costituito da motivi geometrici e naturalistici. Un altro gruppo di ambienti riferibili ad un edificio di prestigio si sviluppano nella parte settentrionale del sito: le stanze, con pavimentazioni musive, sono articolate intorno ad uno spazio aperto centrale ed una di esse conserva un sistema di riscaldamento¹⁴⁶.

Data la vastità della superficie da indagare, la zona è stata suddivisa in settori all'interno dei quali l'acquisizione dei profili, con figurazione dipolo-dipolo, è stata effettuata su linee parallele distanti 1m con lunghezza variabile adattando la griglia alla logistica dei siti. Acquisite tutte le misure, per l'elaborazione i dati sono stati assemblati al fine di creare un'unica tomografia di resistività. Nella *Figura 5.7* viene mostrata la tomografia di resistività relativa ad 1m di profondità, georeferenziata e posizionata sulla planimetria di scavo. L'elaborato mostra in modo chiaro l'elevata presenza di anomalie alto-resistive su tutta la superficie riferibili a delle strutture di probabili ambienti. Grazie al lavoro di interpretazione è stato possibile tracciare (segmenti blu) l'orientamento degli elementi sepolti e suggerire una loro possibile articolazione.

Il lavoro di interpretazione è stato facilitato con lo studio tridimensionale della mappa tomografica: applicando diverse scale cromatiche sono state realizzate delle visualizzazioni 3d che hanno messo meglio in evidenza gli elementi ancora sepolti; confrontando i diversi prodotti si è potuto segnalare con sicurezza l'orientamento delle strutture antropiche in funzione anche dell'adiacente scavo (*Figura 5.8-5.9*). Nonostante i risultati ottimali, che hanno permesso di realizzare in tempi brevi una mappatura sub-superficiale del terreno su un'area di estensione considerevole, solo un saggio stratigrafico potrà verificare quanto detto e accertare la natura di tali disomogeneità.

¹⁴⁶ www.archeologia.lazio.beniculturali.it; www.fastionline.it.

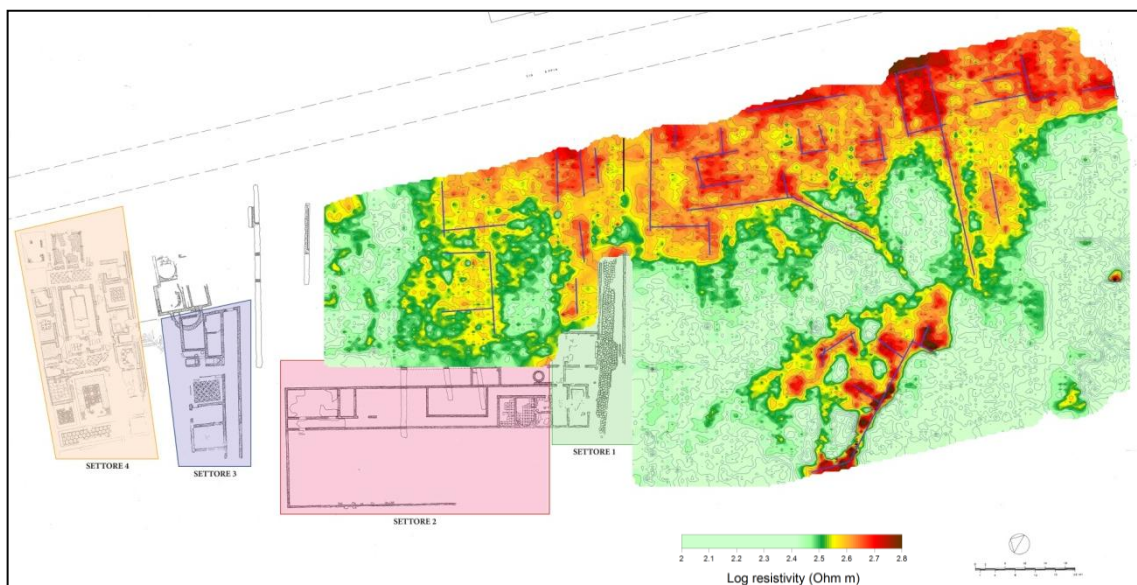


Figura 5.7 Planimetria dello scavo archeologico con la sovrapposizione della tomografia relativa a 1m di profondità..

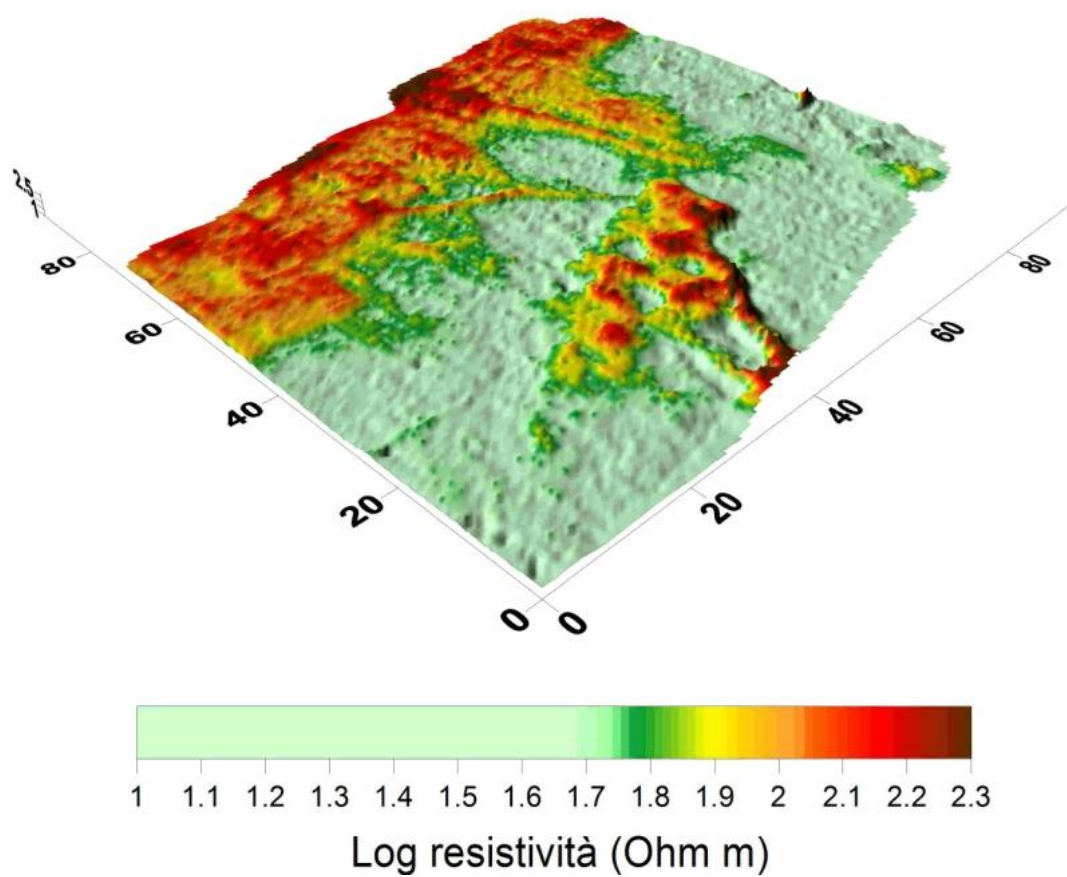


Figura 5.8 Tomografia tridimensionale dell'area investigata.

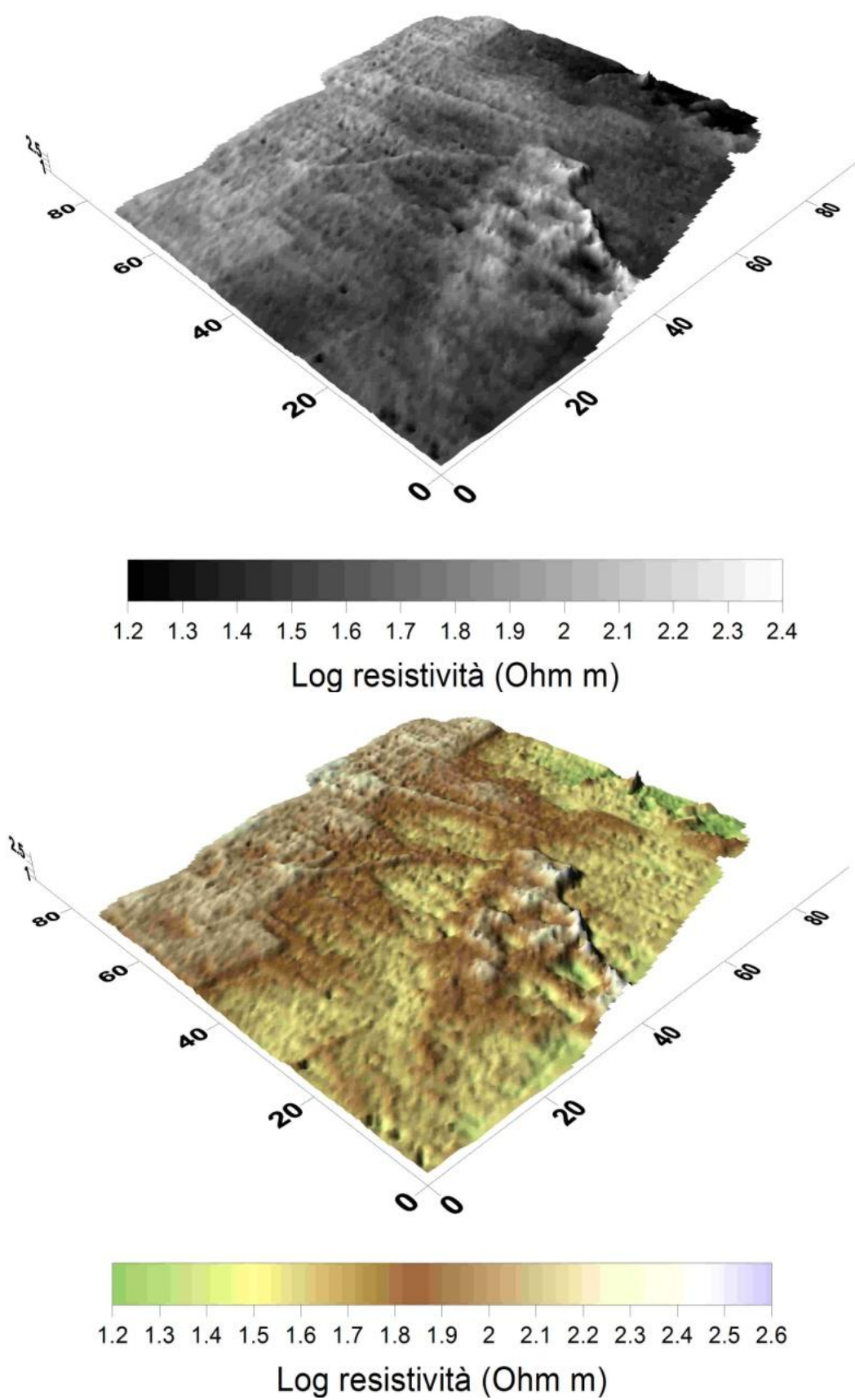


Figura 5.9 Tomografie tridimensionali dell'area investigata.

5.3 SCHIAVI D'ABRUZZO – SITO ARCHEOLOGICO DEI TEMPLI ITALICI

L'area dei templi è situata in località Colle della Torre a circa 864 m s.l.m. e si affaccia sulla vallata del fiume Trigno. Il sito archeologico è stato soggetto a diverse campagne archeologiche che hanno messo in evidenza strutture differenti.

Dal momento che la fascia antistante ai templi, compresa tra questi e l'ingresso del sito, non è mai stata indagata in modo diretto, su richiesta della Soprintendenza per i Beni Archeologici dell'Abruzzo è stata effettuata una mappa di resistività al fine di intercettare le possibili strutture di natura antropica ancora sepolte e capire la loro articolazione per determinare una loro eventuali relazione con i templi esistenti (*Figura 5.10*).



Figura 5.10 - Foto aerea del sito con l'indicazione della zona investigata (Google Earth).

Nel sito archeologico sono attestate due fasi edilizie: il nucleo principale della fine del III - inizi II secolo a.C. che riguarda le opere di monumentalizzazione del luogo di culto originale e la creazione del tempio maggiore e del muraglione di terrazzamento; la costruzione del tempio minore e dell'altare nell'area antistante degli inizi del I secolo. Segni di rioccupazione del luogo si hanno fino al XIV sec.: al di sopra del tempio maggiore venne costruita una chiesa, mentre l'area antistante venne occupata da una necropoli¹⁴⁷.

L'area indagata è posizionata nella parte antistante il tempio maggiore e ricopre una fascia lunga 50m e larga 20m (*Figura 5.10*). L'acquisizione dei profili, con figurazione

¹⁴⁷ COARELLI - LA REGINA 1984.

dipolo-dipolo, è stata effettuata all'interno di una griglia con linee parallele distanziate ogni metro e con lunghezza variabile, in modo da adattare la configurazione adoperata alla logistica dell'area e coprire il primo metro di profondità.

La tomografia di resistività così ottenuta (*Figura 5.11*) evidenzia la presenza di una lunga fascia basso-resistiva (cerchiata in rosso) poco rilevante, e anomalie alto resistive (interpretate con linee blu) posizionate nella parte antistante il tempio maggiore.

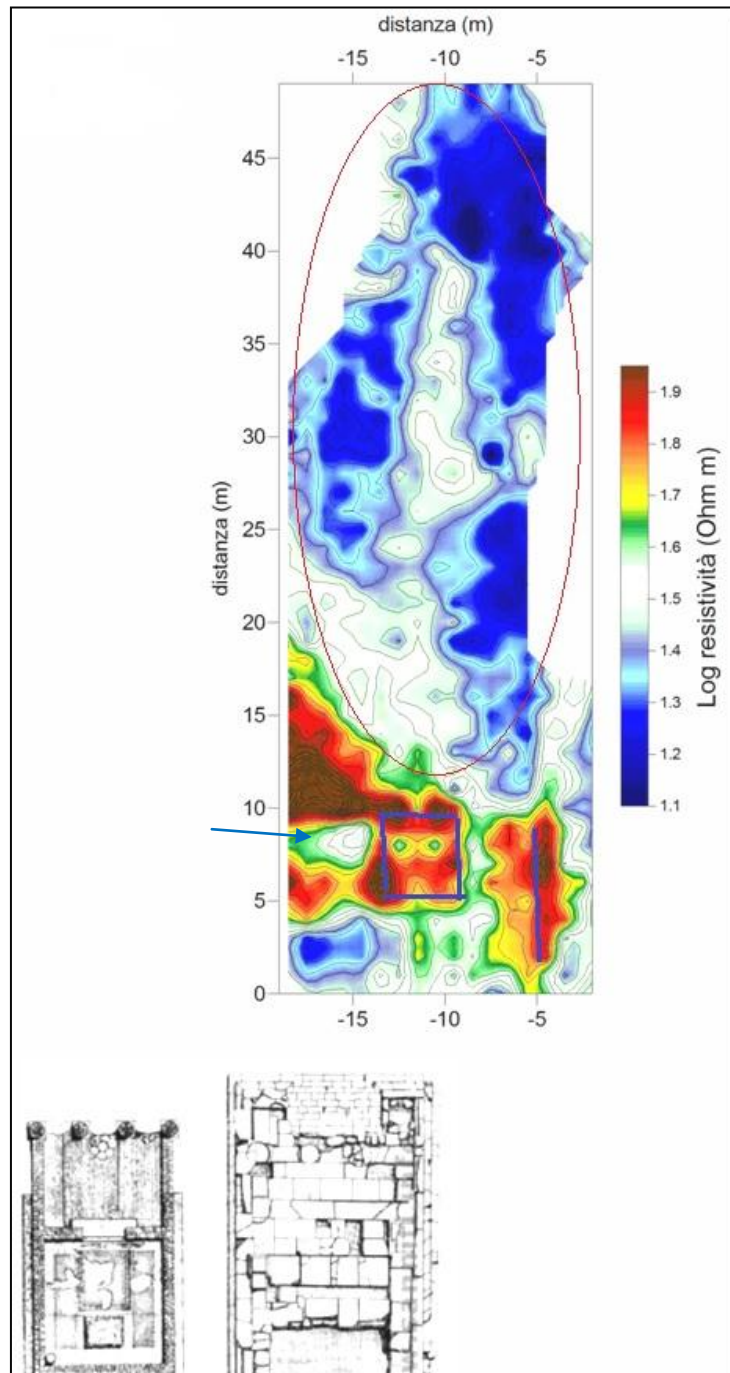


Figura 5.11 - Planimetria del sito con la tomografia relativa a 1 m di profondità.

Esse presentano una geometria pressoché regolare per cui; con ogni probabilità, riferite a strutture di tipo antropiche. Fa eccezione l'anomalia indicata con la freccia blu, per la quale non si esclude che si tratti di materiale di riporto oppure di una zona in cui è stato accumulato il materiale durante le diverse campagne archeologiche, dal momento che una zona di accumulo è presente proprio accanto all'anomalia. Per la loro posizione, però, si esclude una connessione con i templi italici. Solo futuri saggi stratigrafici potranno chiarire la natura di tali disomogeneità.

5.4 MORCONE

Le indagini geofisiche condotte nel comune di Morcone sono state realizzate nell'ambito della collaborazione tra il Dipartimento di Scienze Umanistiche, Sociali e della Formazione dell'Università degli Studi del Molise e la Soprintendenza per i Beni Archeologici di Salerno, Avellino, Benevento e Caserta; l'esigenza della Soprintendenza era quella di verificare in maniera rapida ed efficace la possibile presenza di strutture archeologiche sepolte. Per le tre aree investigate (*Figura 5.12*), con profili spaziati 1m utilizzando una distanza dipolare di 1m, sono state ricavate delle tomografie relative a 1m di profondità.



Figura 5.12 – Ubicazione delle aree di indagine su ortofoto (Google Earth).

Per l'area 1 è stata coperta una superficie di 50m x 50m. Nella tomografia emergono due tipi di anomalie alto resistive: una di grandi dimensioni indicata con A (linee tratteggiate nere) composta da un allineamento di circa 30m di lunghezza; l'altra indicata con B (linee tratteggiate azzurre), concentrata in un areale pressoché quadrato e presenta una geometria regolare (Figura 5.13).

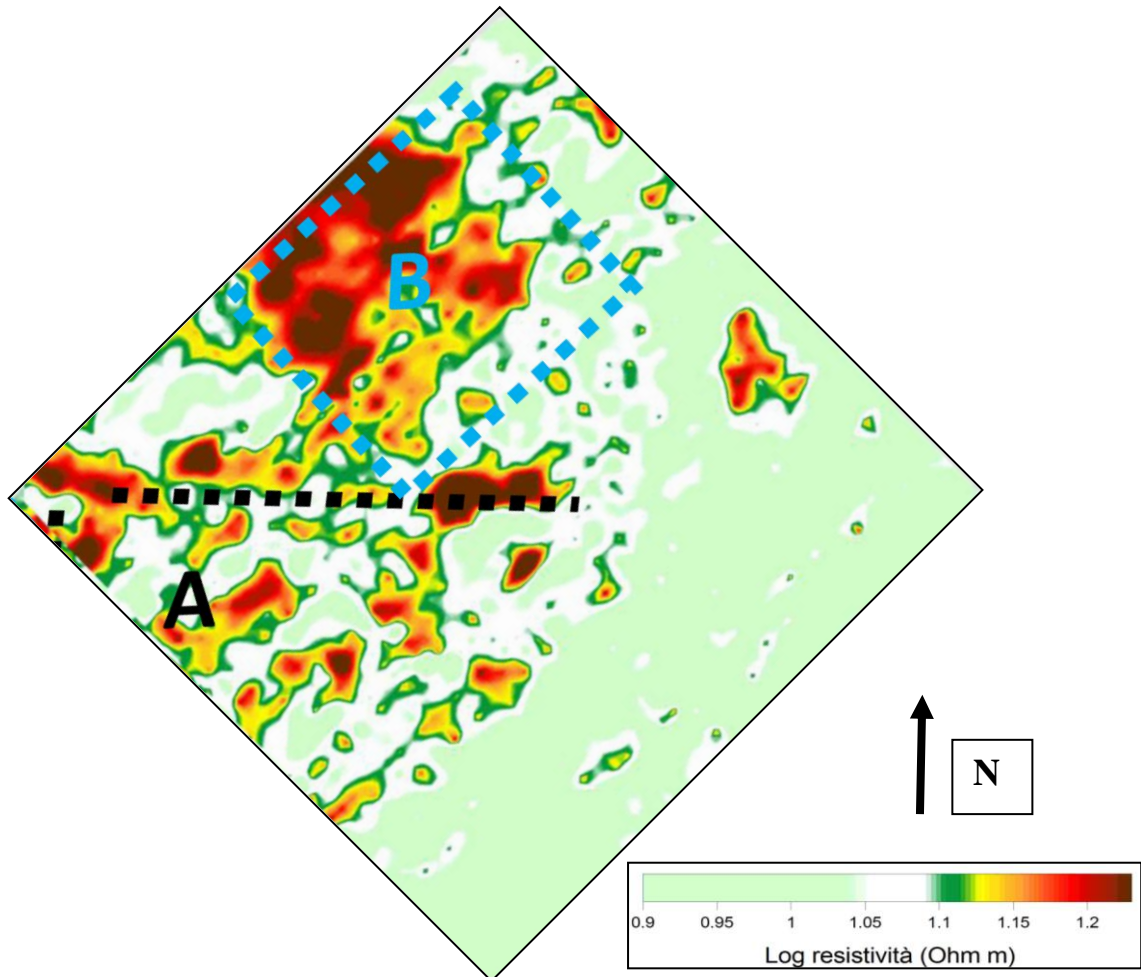


Figura 5.13 - Area 1: mappa tomografica relativa ad 1m di profondità con linee interpretative.

L'area 2 con superficie più piccola rispetto alle altre, di circa 17m x 26m, ha restituito una mappa tomografica che mostra una serie di anomalie perfettamente ortogonali tra di loro e distribuite secondo una maglia abbastanza regolare (i contorni sono stati indicati con linee tratteggiate nere) (Figura 5.14).

Anche per l'area 3, con superficie di 30m x 25m, sono emerse anomalie interessanti: sono evidenti due anomalie semicircolari parallele (distanziate circa 5m) ed un'anomalia rettilinea con orientamento nord-sud (Figura 5.15).

In base a quanto è emerso dalle mappe tomografiche sono stati consigliati degli scavi diretti per verificare l'esatta natura delle anomalie evidenziate.

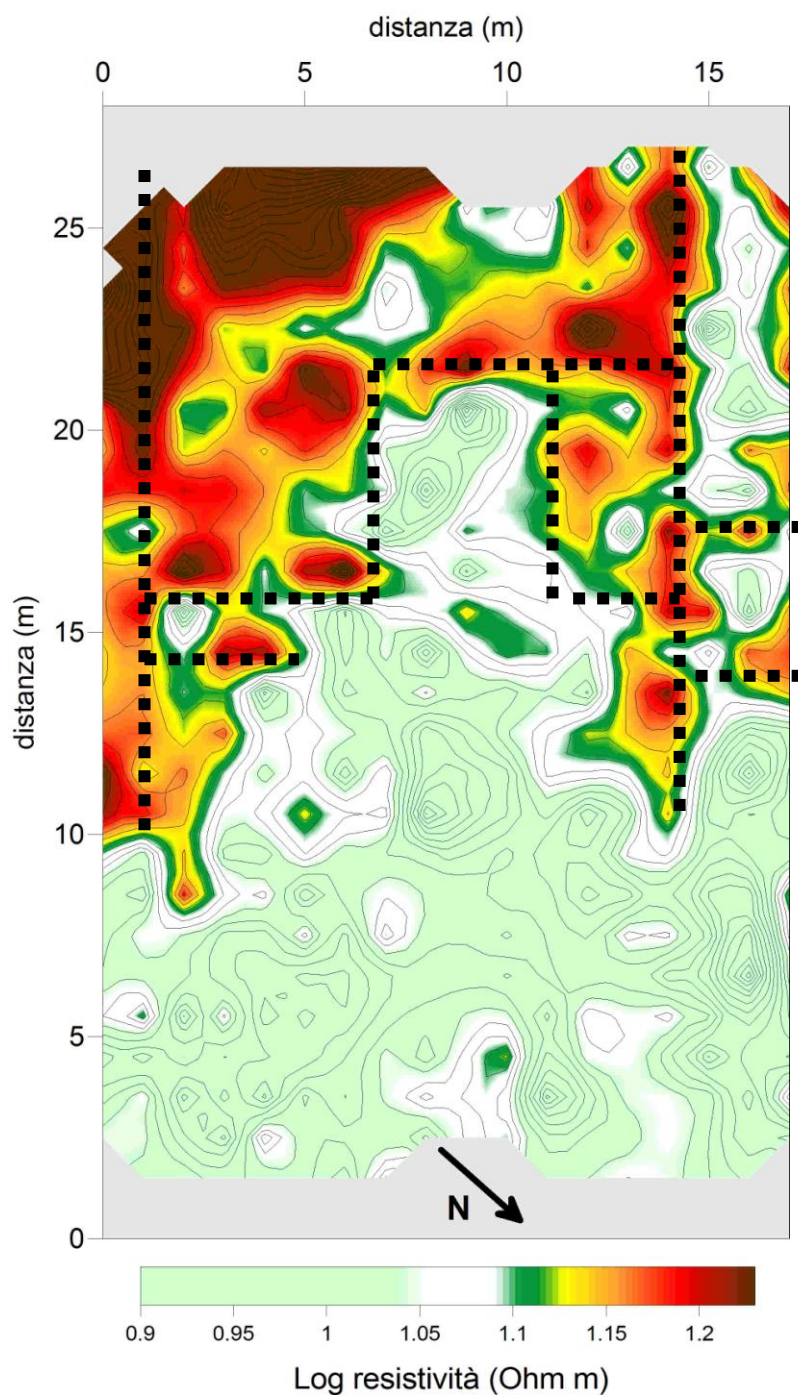


Figura 5.14 – Area 2: mappa tomografica relativa ad 1m di profondità e schema interpretativo.

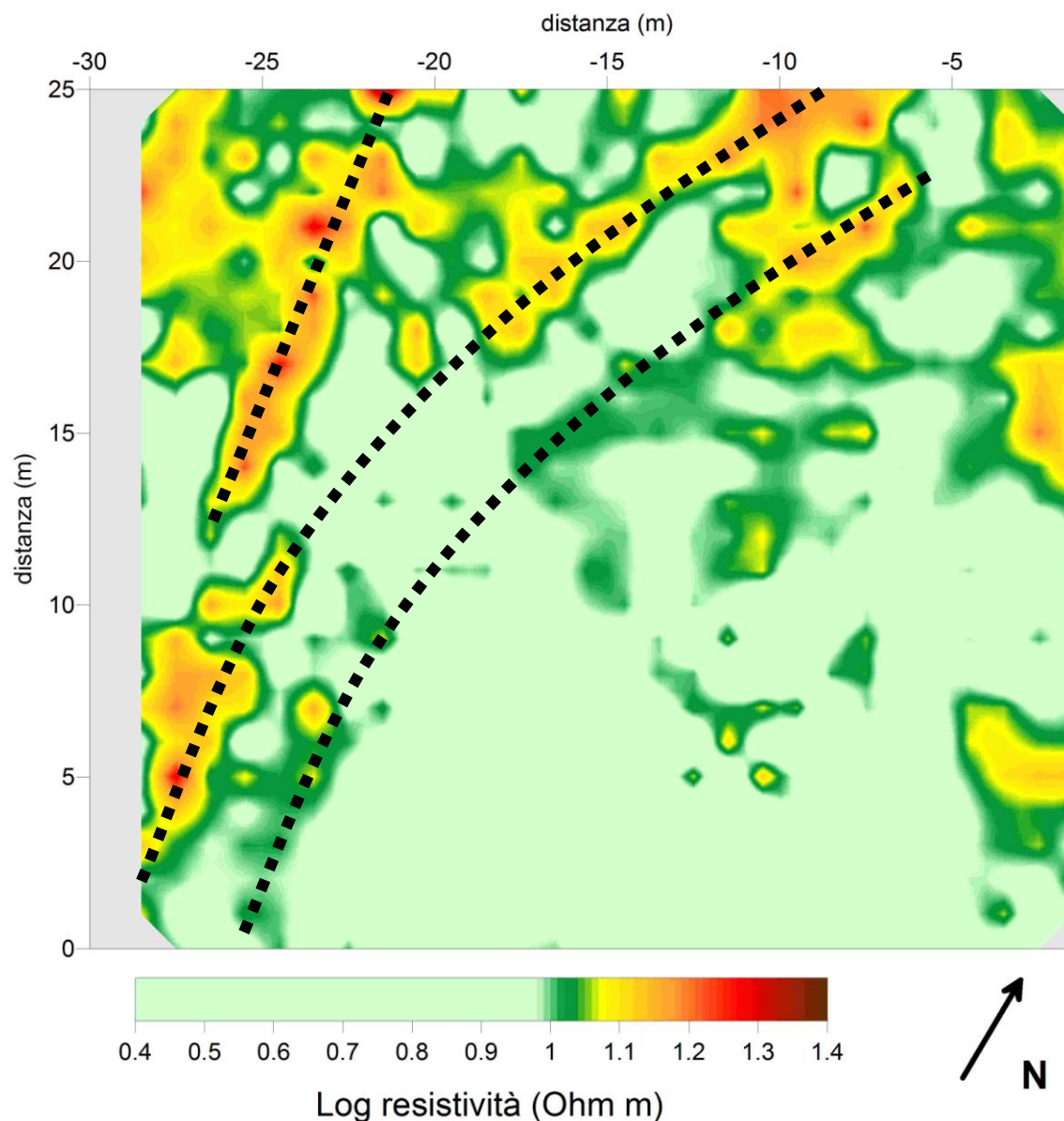


Figura 5.15 - Area 3: mappa tomografica relativa ad 1m di profondità e schema interpretativo.

5.5 CASALPIANO -LA BADIA DI S. MARIA

La badia romanica di S. Maria di Casalpiano cade nel comune di Morrone del Sannio (CB). L'indagine è stata condotta con tomografia elettrica ed ha interessato cinque aree di grandezza variabile (*Figura 5.16*). Lo scopo è stato quello di accertare la presenza di strutture archeologiche sepolte in quattro aree adiacenti allo scavo e in una zona nella parte anteriore all'ingresso della chiesa. Gli scavi archeologici presso il complesso, hanno messo in evidenza diverse fasi archeologiche. Per l'età tardo-repubblicana l'insediamento rurale doveva avere notevoli proporzioni, come testimoniano le strutture



Figura 5.16 – Ubicazione delle aree di indagine su ortofoto (Google Earth).

e i materiali affioranti nei terreni agricoli circostanti. L'emergere di tracce inerenti ad impianti di produzione e conservazione nella parte dei quartieri residenziali e servili, suggeriscono lo sfruttamento delle risorse agricole, la lavorazione dei prodotti e ad attività semindustriali. Alla fine del II - inizi del I secolo a.C. risalgono alcuni ambienti dotati di pavimenti in *opus signinum* con decorazione geometrica. Gli stessi ambienti subiscono un ampliamento nella prima età imperiale, come testimonia la costruzione di altri ambienti delimitati da muri in *opus reticulatum* e di un impianto termale. Immediatamente all'esterno della badia sono emerse oltre 70 sepolture risalenti alla fase alto medievale (VI/VII secolo d.C.) e coincidenti all'abbandono e al crollo della villa rustica dopo il V secolo d.C. In età medievale il complesso benedettino probabilmente comprendeva una serie di edifici con relativi annessi¹⁴⁸.

All'interno dei saggi d'indagine l'acquisizione dei dati è stata effettuata su profili paralleli (disposizione dipolo-dipolo) distanti 1m e con lunghezza pressoché regolare, adattando la griglia di acquisizione alla logistica dell'area. Nella Figura 5.17 vengono mostrati i risultati delle indagini tramite la realizzazione di una tomografia di resistività.

¹⁴⁸ TERZANI - DE BENEDITTIS, 2005.

L'elaborato, posizionato sulla planimetria di scavo, mostra in modo chiaro la presenza di zone anomale alto resistive (in rosso) e basso resistive (in blu). Solo alcune di esse rilevano risultati interessanti, per le quali è stato consigliato un saggio stratigrafico per verificare la natura di tali disomogeneità. Per i saggi A e B sono segnalate alcune anomalie che potrebbero riferirsi a possibili tracce antropiche (segmenti blu); considerando la presenza degli alberi (le radici potrebbero aver causato possibili disturbi nel segnale e quindi alterato i valori), non si avanza nessuna interpretazione. Lo stesso vale per E: l'anomalia intercettata potrebbe riferirsi a materiale di riempimento o pietre accumulate durante i lavori effettuati nella parte antistante la chiesa. C e D, mentre, potrebbero riferirsi a strutture antropiche: la loro forma è piuttosto lineare, e in particolare per C gli allineamenti sembrerebbero simili a quelli dell'adiacente scavo.

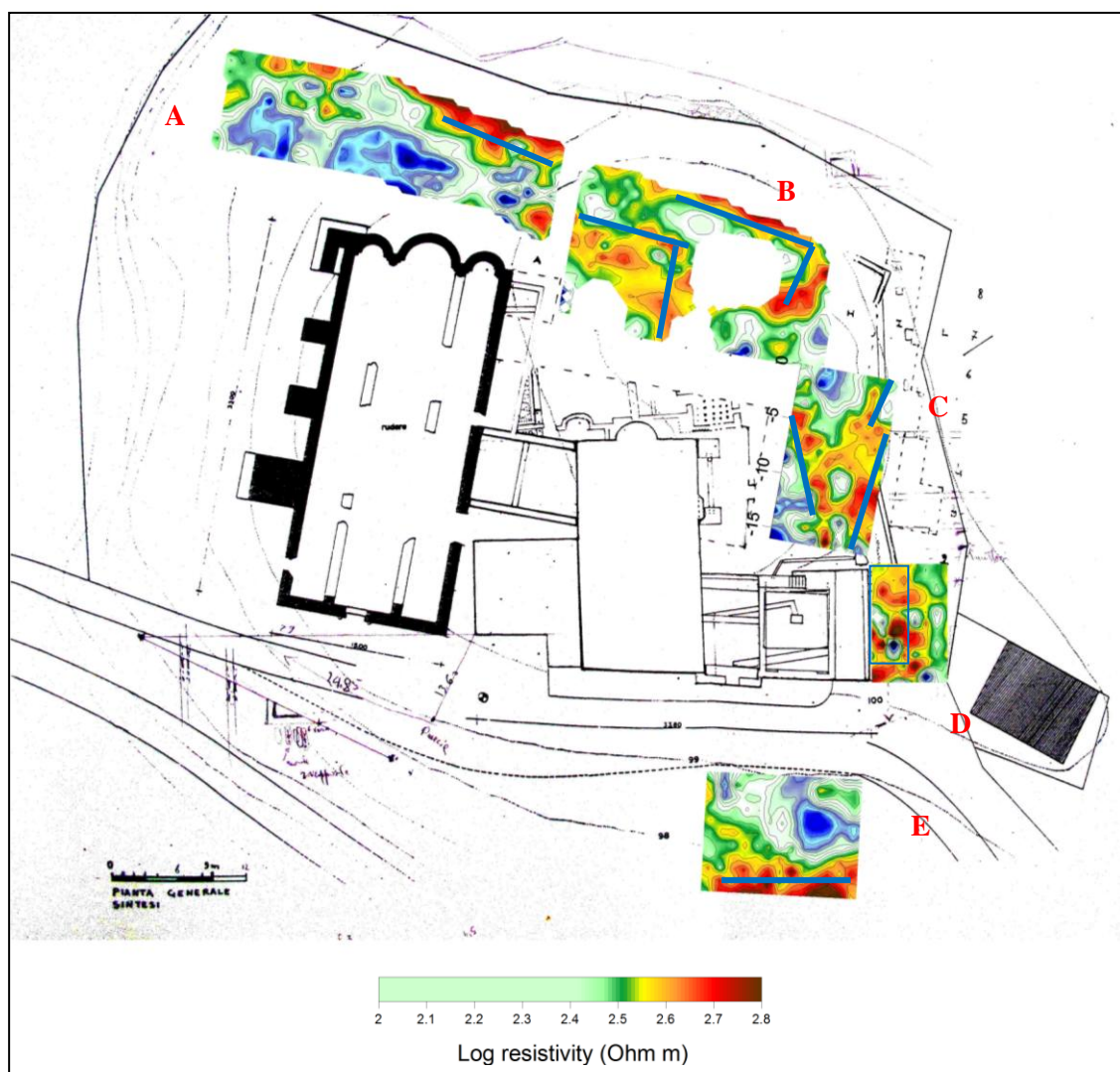


Figura 5.17 - Tomografie elettriche relative alle cinque zone indagate.

5.6 FROSOLONE – FORTIFICAZIONE SANNITICA

Lo studio effettuato nel comune di Frosolone (IS) è stato svolto nell'ambito della collaborazione tra lo Spin-off G.A.I.A. Business System del Dipartimento di Scienze Umanistiche, Sociali e della Formazione, Università degli Studi del Molise, Italia Nostra Molise e il Comitato Nazionale del Paesaggio (Sezione Molise). La ricerca rientra in un progetto multidisciplinare¹⁴⁹ ed ha previsto indagini geofisiche, ricognizioni archeologiche, rilievo tramite GPS e fotogrammetria; lo scopo era quello di raccogliere maggiori informazioni sulla fortificazione sannitica. In questa sede si riportano solo i risultati della ricognizioni e delle indagini geofisiche.

Nella seconda metà del IV secolo a.C. furono costruite in Molise numerose fortificazioni, sia per scopi difensivi che di controllo delle vie di comunicazione e dei pascoli. I luoghi scelti per la costruzione di queste cinte murarie erano le sommità dei rilievi strategicamente più importanti, perfettamente a vista l'una con l'altra così da creare una potente rete difensiva. Le mura erano realizzate in *opera poligonale* con blocchi calcarei di forma irregolare posti in opera a secco, e lungo il perimetro si apriva una o più porte.

La cinta muraria di Frosolone (*Figura 5.18*) ha da sempre suscitato curiosità verso gli studiosi, sia essi topografi che archeologi, i quali hanno cercato di ricostruire lo sviluppo delle mura e di capire la loro funzione. Ricordiamo tra gli studi più importanti quelli effettuati da La Regina¹⁵⁰ e Oakley¹⁵¹. Il primo sostiene che si potrebbe riconoscere l'importante centro sannitico di *Cominium* in Frosolone o Carovilli, e che Frosolone probabilmente ospitava un insediamento stabile data la sua articolazione, ma per le sue caratteristiche non può essere qualificato come centro urbano: la fortificazione racchiude un'area di $150.000m^2$ articolata in settori autonomi con un perimetro esterno di $1.900m$ (comprende due alture, Civitella (1.206 s.l.m.) e Castellone (1.210 s.l.m.) con una valletta intermedia). Secondo Oakley invece, il sito era un centro sannitico molto importante e per la sua dimensione si colloca al di sopra di tutte le altre fortezze della zona; esso si sviluppa su circa 15 ettari sul bordo della terra arabile ed è formato da tre circuiti separati da mura poligonali: il primo sulla collina di Civitella

¹⁴⁹ I risultati sono stati presentati nel Convegno "Quale futuro per il passato" (Frosolone (IS), 27 dicembre 2014) e successivamente pubblicati nella rivista *Considerazioni di Storia ed Archeologia, Il contributo della geofisica nello studio delle forme insediative del Sannio in territorio molisano*, 2014, pp. 69-85.

¹⁵⁰ LA REGINA 1975, 1989.

¹⁵¹ OAKLEY 1995.

dove probabilmente era collocata l'acropoli, il secondo racchiude la valle tra Civitella e Castellone, il terzo circonda il fianco orientale di Castellone e presumibilmente all'interno vi pascolava il bestiame.

La ricognizione archeologica è stata effettuata ispezionando a tappeto i monti Castellone Nord, Castellone Sud e le rispettive valli. Effettuando strisciate parallele equidistanti tre metri, sono state analizzate 23 aree (*Figura 5.19*). Le uniche zone che hanno restituito del materiale archeologico sono state le aree I, II, VII, VIII, IX, X, XI e XII. I materiali rinvenuti sono riferibili a laterizi, frammenti di ceramica e un unico frammento di metallo rappresentante un cardine di una porta. I laterizi sono concentrati soprattutto nelle aree IX, X e XI ma non si trovano in situ in quanto recuperati accatastati su alcune rocce. La ceramica, rappresentata da pochi frammenti, è stata recuperata in maniera più massiccia nell'area II e in maniera molto sporadica nelle aree IX e X. Tutte le altre aree, tranne le zone III, XIII, XIV, XV, XVI e XVII dove la

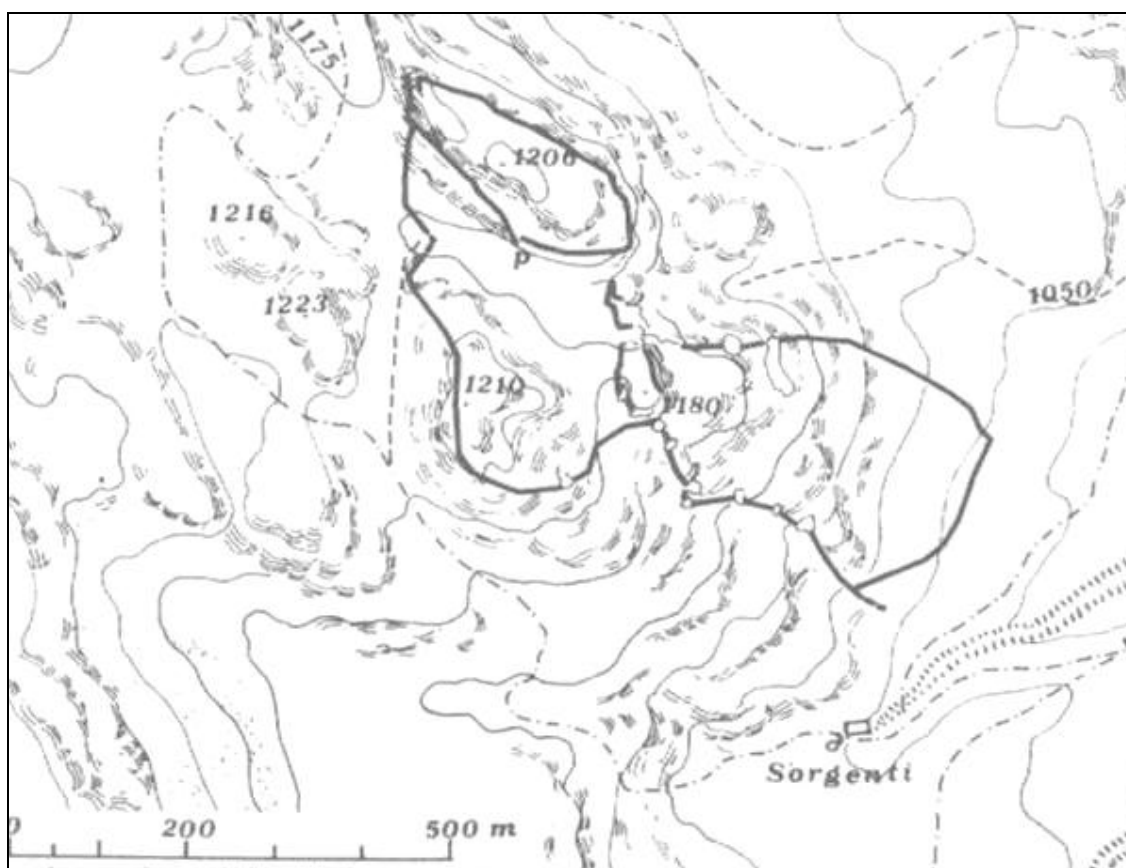


Figura 5.18 – Cinta muraria di Frosolone (IS) (B. Di Marco, La Regina 1989 fig.15).

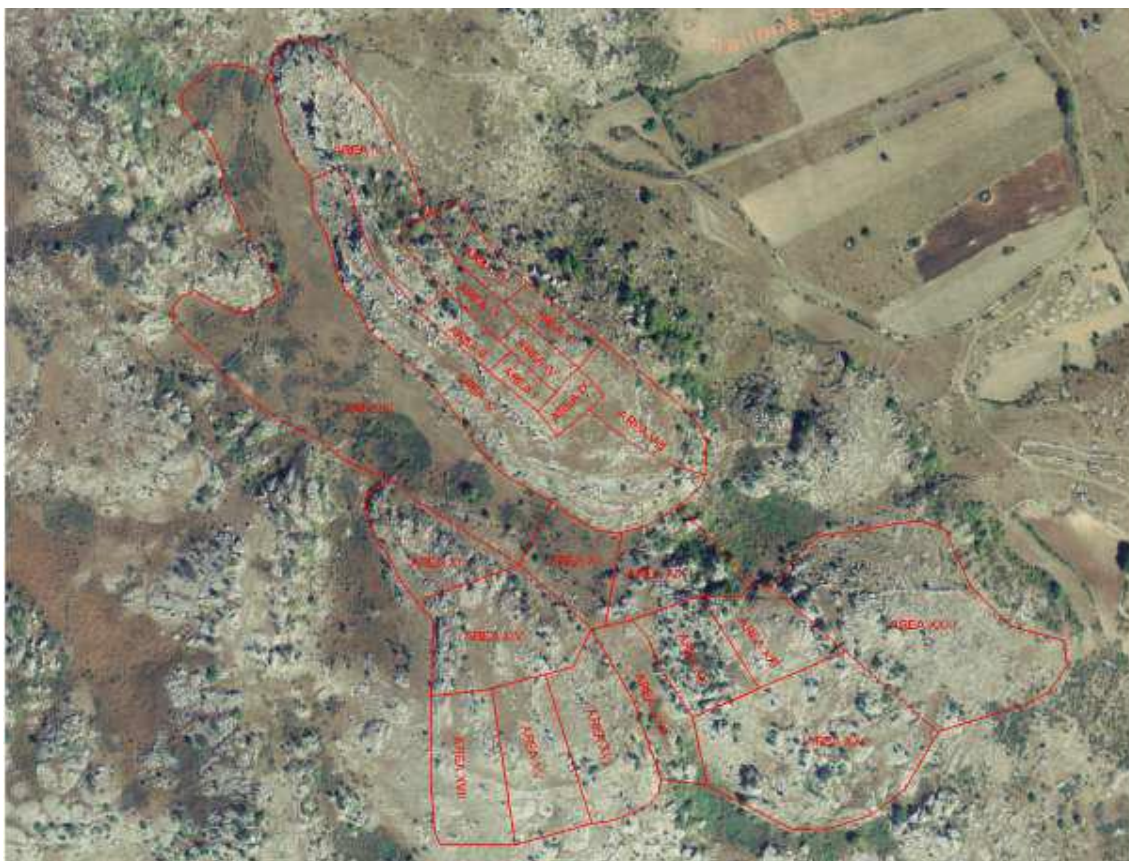


Figura 5.19 - Localizzazione delle 23 aree di ricognizione archeologica su ortofotocarta.

vegetazione abbondante impediva la visibilità, sono risultate sterili di materiale archeologico. Nonostante ci sia la presenza di laterizi e frammenti di ceramica, dai dati raccolti non si può parlare di un insediamento stabile, poiché i materiali esaminati sono molto esigui. I sopralluoghi si sono estesi anche nella vicina Località Confalone dove è stato individuato un altro sito dov'è stato raccolto del materiale archeologico superficiale (frammenti di ceramica e metallo); questi mostrano una datazione molto più tarda rispetto ai materiali provenienti da Castellone Nord e Sud e farebbe pensare all'esistenza di un insediamento Medievale.

Le aree d'indagine geofisica sono state scelte in base alla disponibilità di spazi sufficientemente ampi, privi di vegetazione e/o rocce e al potenziale archeologico (Figura 5.20).

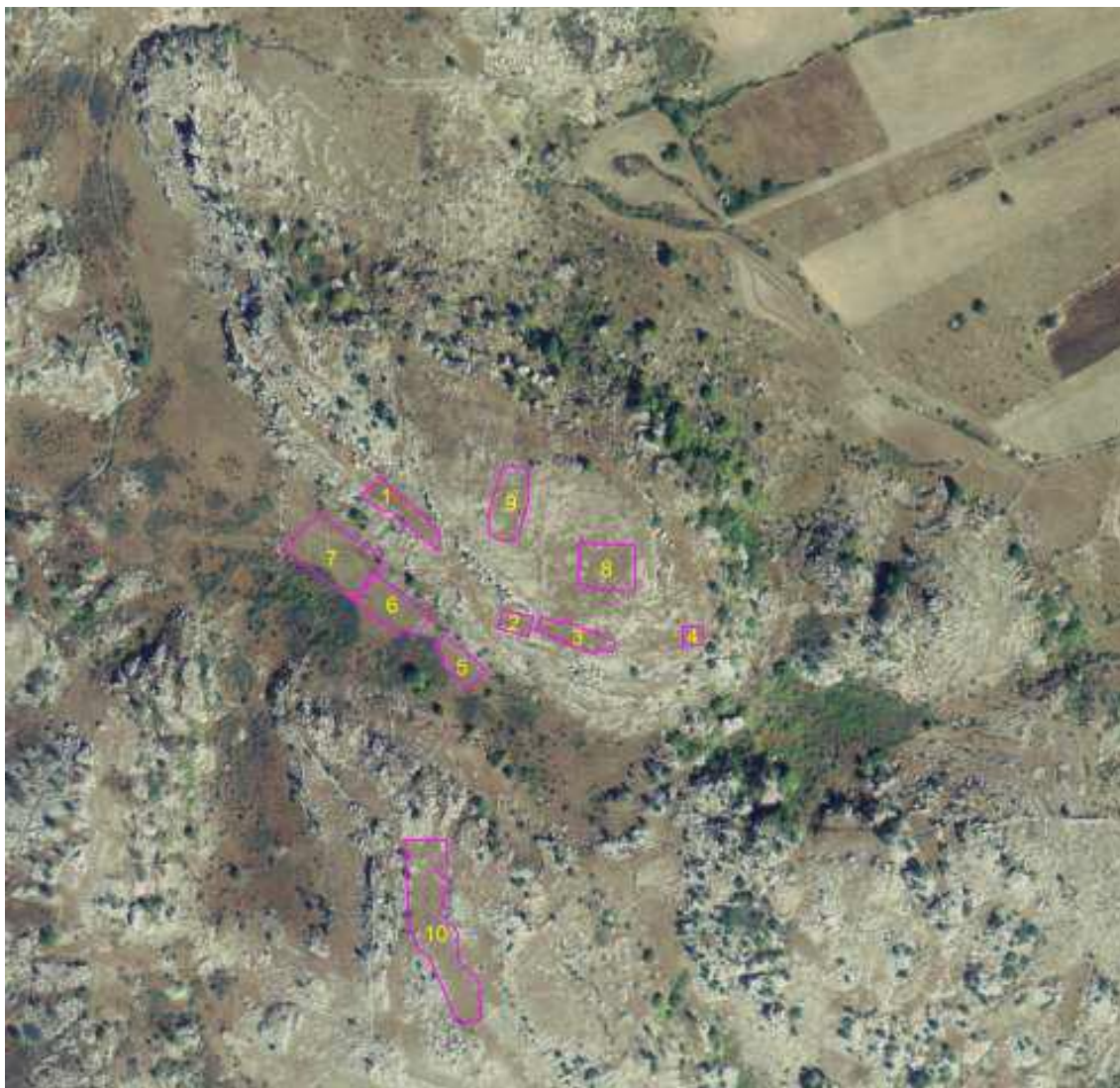


Figura 5.20 – Ubicazione delle aree di indagine (Google Earth).

L'acquisizione del dato geoelettrico (in modalità dipolo-dipolo assiale) è stato condotto posizionando le griglie di misura impostate adeguando, di volta in volta, il perimetro dell'areale alla morfologia delle 10 zone scelte per l'indagine, garantendo una spaziatura di almeno un metro tra i profili di indagine. Le mappe tomografiche ottenute sono riferite tutte a 1m di profondità.

Area 1: le anomalie resistive (in rosso), con forma irregolare, sono localizzate sui bordi dell'area indagata e molto probabilmente sono ascrivibili alla roccia naturale che affiora quasi in superficie (*Figura 5.21*).

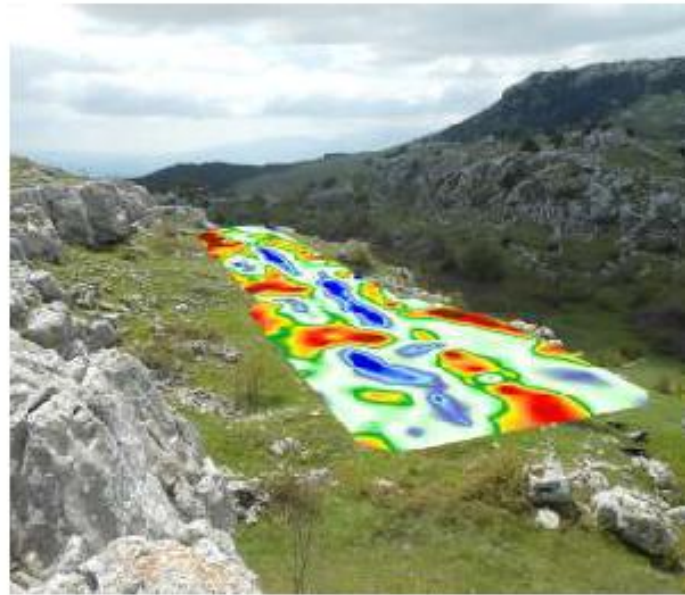
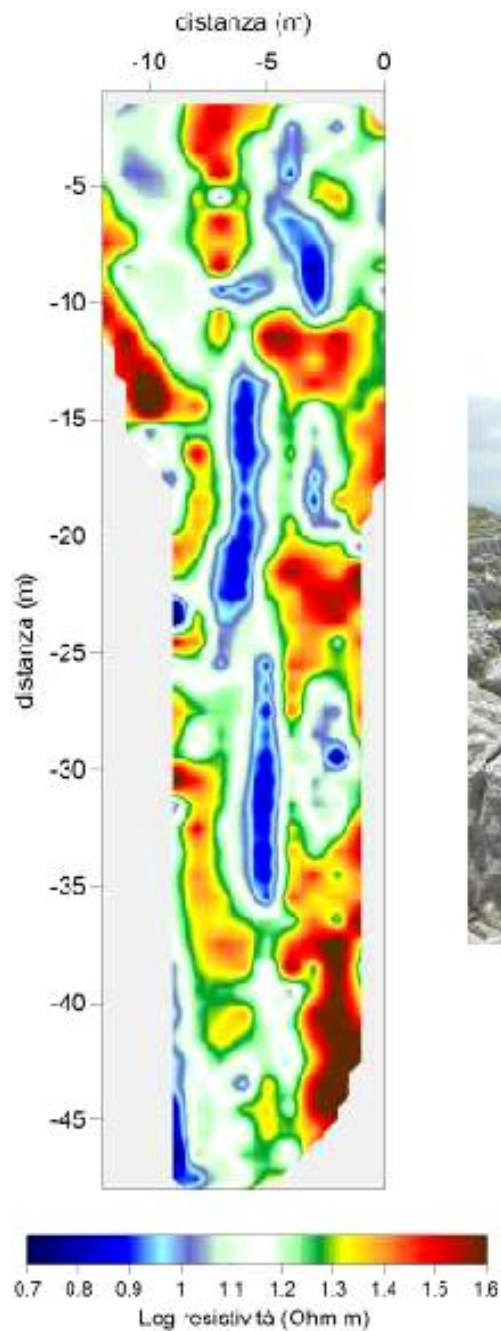
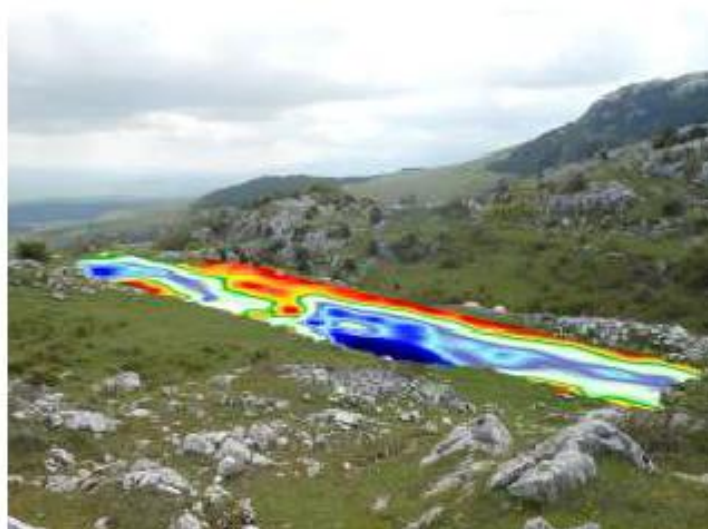
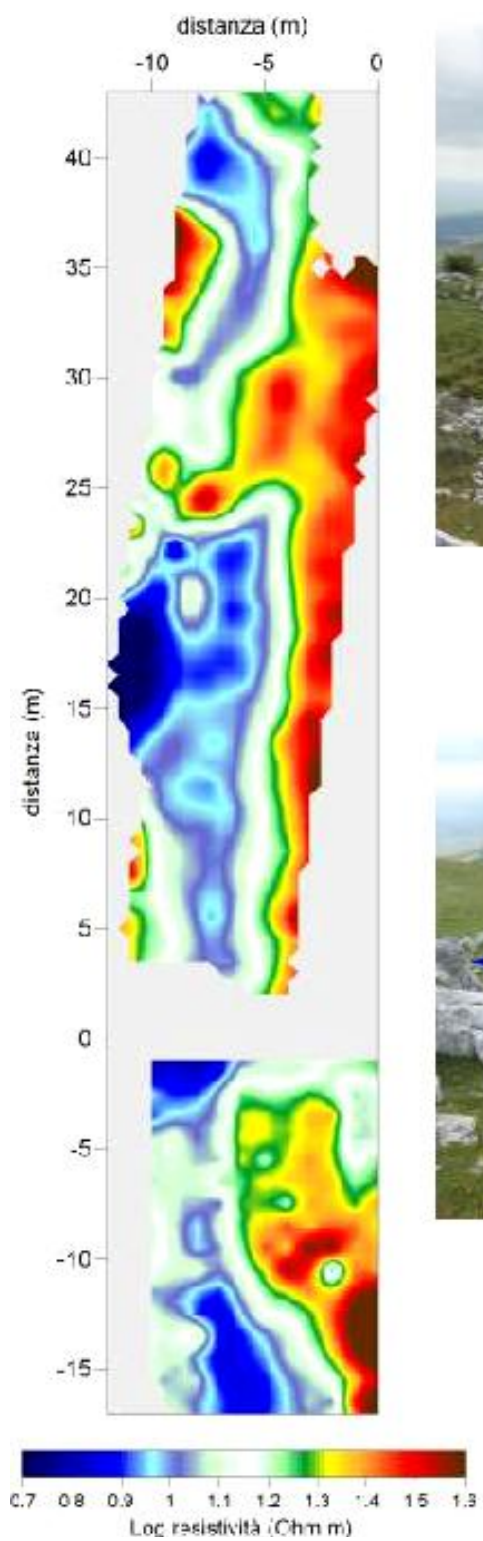
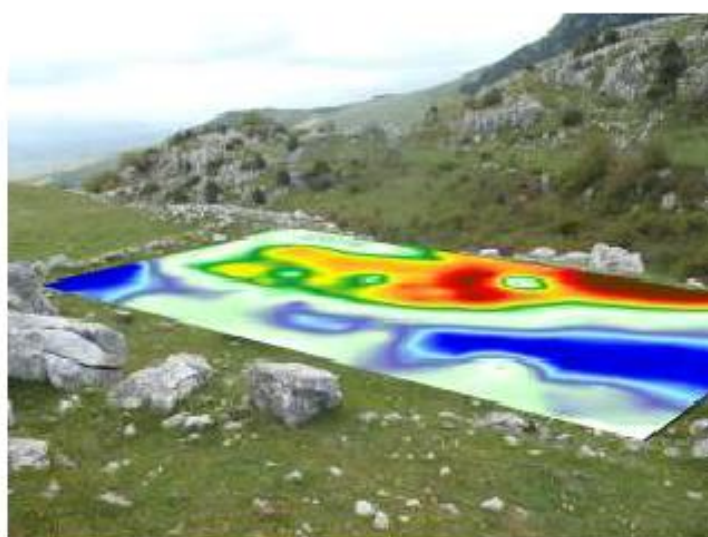


Figura 5.21 – Area 1: mappa tomografica (sinistra) e visualizzazione dei risultati su foto (destra).

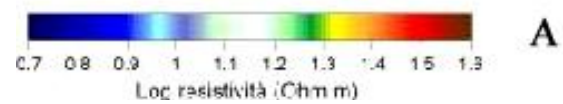
Area 2-3: in entrambi i casi le anomalie alto resistive (nella Figura 5.22, A in rosso), pur avendo delle geometrie regolari, sono imputabili alle rocce naturali presenti a destra dell'area indagata. Per l'area 2 (Figura 5.22, B) si ha una superficie indagata più grande ma con perimetro molto irregolare; l'area 3 (Figura 5.22, C) invece è perfettamente regolare.



B



C



A

Figura 5.22 – A) Tomografie aree 2-3; B) area 2 tomografia su foto; C) area 3 tomografia su foto:

Area 4: per quest'area le anomalie sono molto più chiare; sulla tomografia (*Figura 5.23*) si evidenziano con delle linee color magenta i contorni dell'anomalia resistiva, presente a sinistra dell'area indagata, da ritenere interessante visti i contorni geometrici abbastanza regolari. Degne di nota sono anche le disomogeneità indicate con delle frecce. Non si esclude che si possa trattare di strutture antropiche.

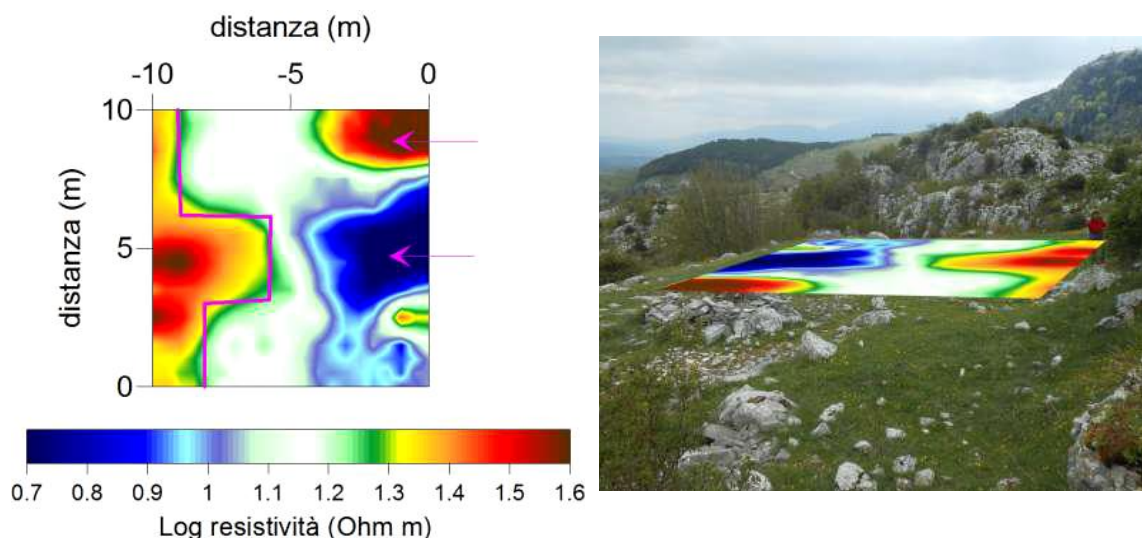


Figura 5.23 – Area 4: a sinistra mappa tomografica con indicazione delle anomalie; a destra visualizzazione dei risultati su foto.

Area 5: le anomalie alto-resistive individuate (*Figura 5.24*) sono difficilmente attribuibili a strutture archeologiche sepolte; sebbene siano di forma irregolare. Esse si concentrano nella parte alta della mappa tomografica.

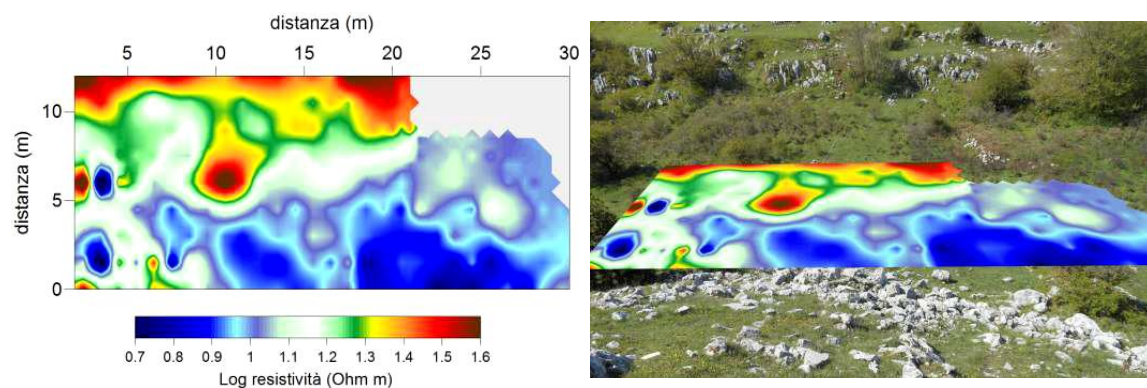


Figura 5.24 – Area 5: a sinistra mappa tomografica , a destra visualizzazione dei risultati su foto.

Area 6: dai risultati della mappa tomografica non sono evidenti anomalie alto-resistive degne di nota; le uniche evidenti, ma con ogni probabilità riferibili alla presenza di roccia, si concentrano negli angoli a destra della mappa (*Figura 5.25*).

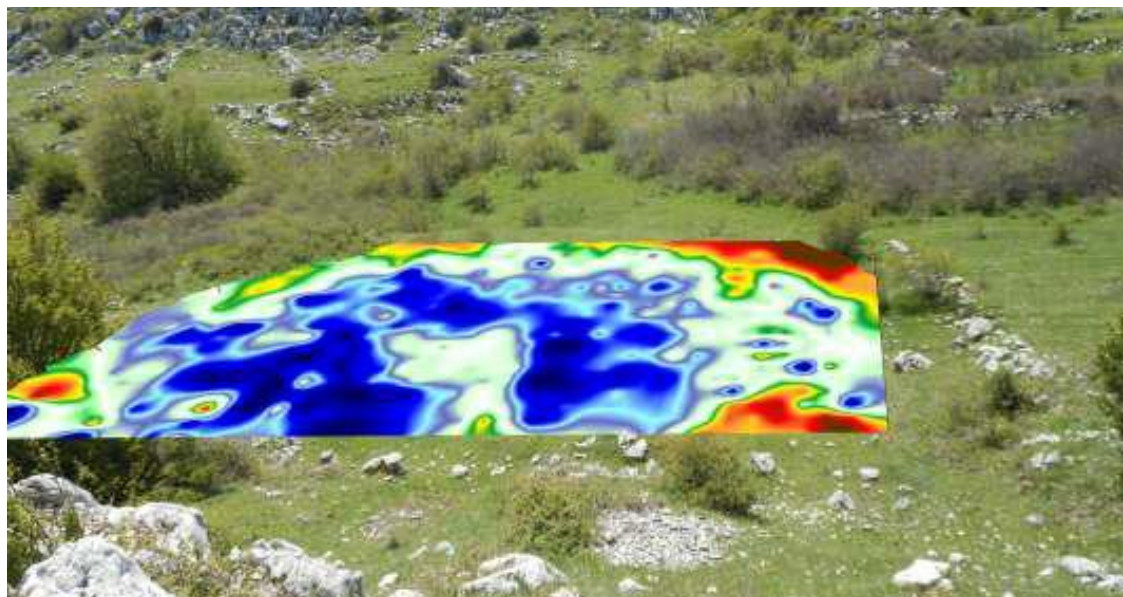
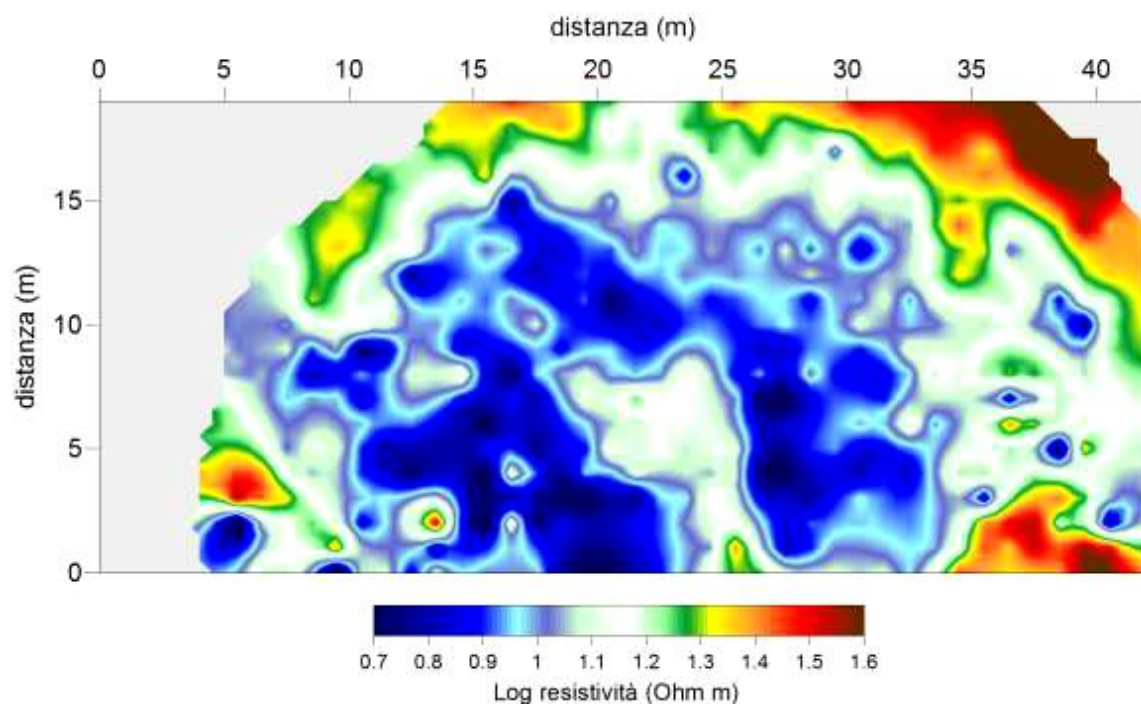


Figura 5.25 – Area 6: in alto mappa tomografica generale, in basso visualizzazione dei risultati su foto.

Area 7: si tratta dell'areale più grande indagato; l'anomalia dal valore alto di resistività più emergente (indicata nella foto dalla freccia, *Figura 5.26*), presenta una forma circolare la cui natura andrebbe verificata con un intervento diretto per escluderne che si tratti di roccia in posto.

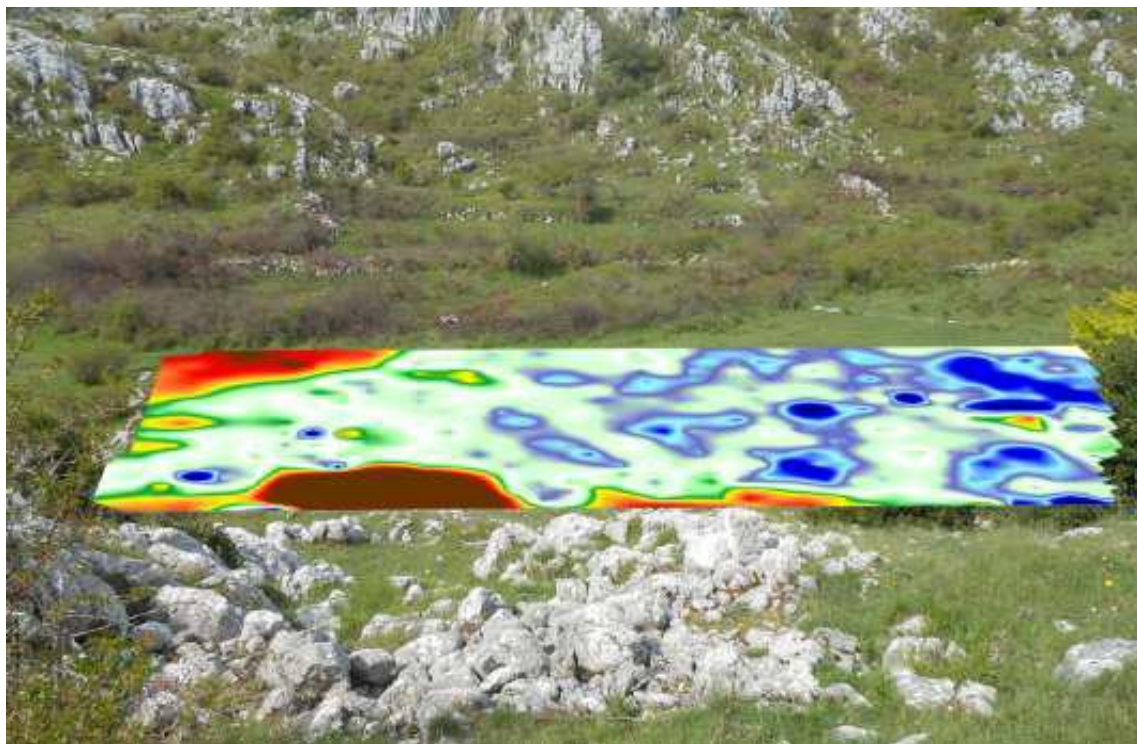
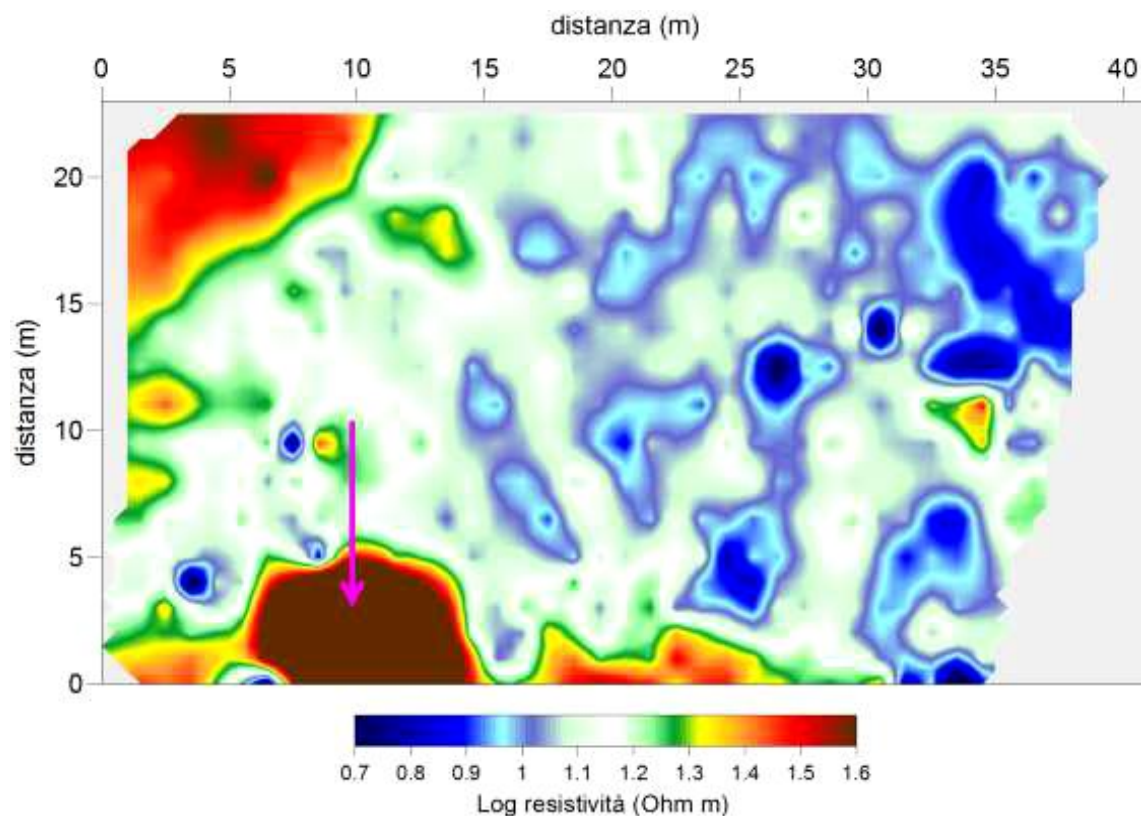


Figura 5.26 – Area 7: in alto mappa tomografica generale, in basso visualizzazione dei risultati su foto.

Area 8: anche in questo caso sono evidenti delle anomalie particolari (*Figura 5.27*): con delle linee color magenta sono indicate delle disomogeneità ad alta resistività dai chiari contorni regolari che andrebbero verificate con azioni dirette, al fine di escludere che si tratti di roccia affiorante vista l'abbondanza di rocce presenti in superficie.

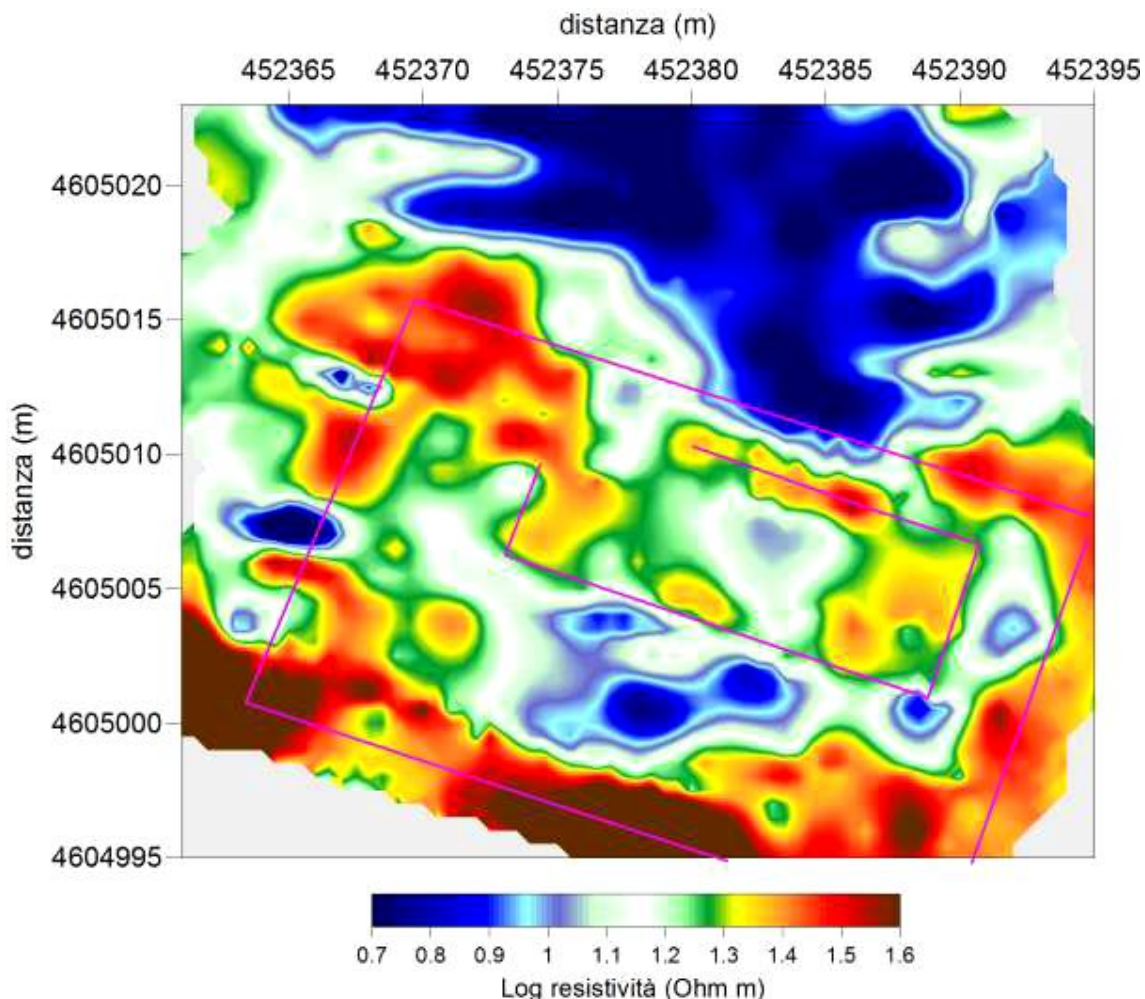


Figura 5.27 – Area 8: mappa tomografica generale con interpretazione delle anomalie.

Area 9-10: dai risultati dell'*area 9* non sono emersi elementi sufficienti per attribuire alle anomalie alto resistive la presenza di strutture archeologiche, ma ciò non esclude che potrebbero essere presenti crolli di struttura antropica data la loro forma. Dalla mappa tomografica ricavata dalle prospezioni dell'*area 10* invece, non si evidenziano elementi degni di nota (*Figura 5.28*).

In conclusione, la presenza di roccia affiorante in superficie ha compromesso molto la discriminazione di eventuali strutture archeologiche sepolte. Le aree 1, 2,3,5,6,9 e 10 sono completamente sterili di probabili elementi antropici interrati, la cui eventuale presenza avrebbe determinato dei chiari e forti contrasti nei valori di resistività.

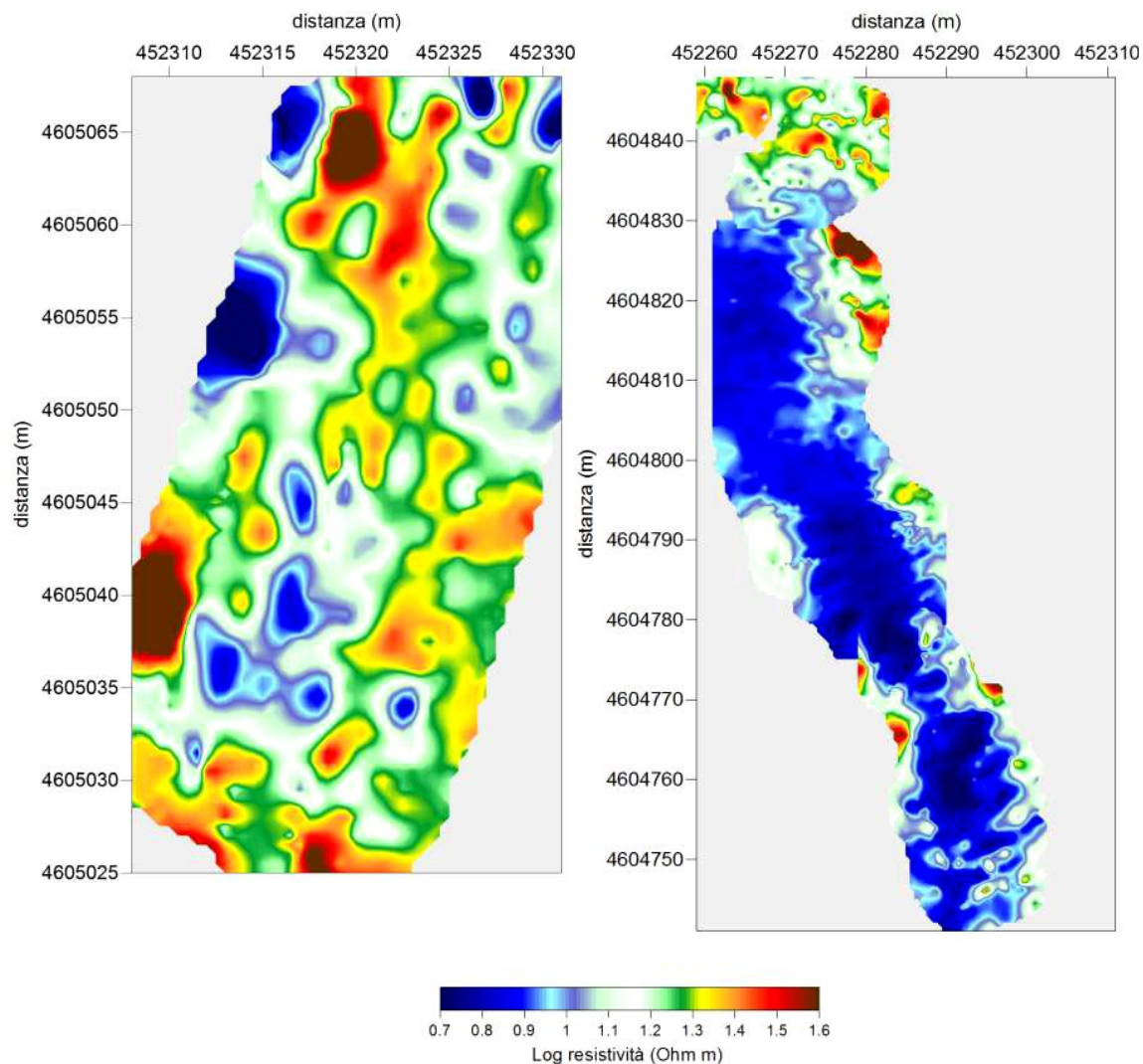


Figura 5.28 – Area 8: mappa tomografica generale con interpretazione delle anomalie.

In altri casi (aree 4, 7 e 8) i risultati l'indagine hanno mostrato la presenza di anomalie di resistività tali da essere compatibili con la presenza di strutture archeologiche. Per queste aree si suggerisce di effettuare delle verifiche di scavo diretta per accertare la natura dei contrasti di resistività.

APPENDICE 1. Inversione probabilistica

L'algoritmo originale sviluppato da Mauriello & Patella nel 1999 considera il set di dati proveniente da un profilo geoelettrico acquisito mediante una qualsiasi configurazione elettrodica $\rho_a(l, n)$ con $l = 1, 2, \dots, L$ che definisce la posizione delle misure, lungo la linea del profilo, e $n = 1, 2, \dots, N$ che ne definisce la pseudo-profondità. Seguendo gli autori, tutta la parte del sottosuolo che contribuisce a determinare i valori di $\rho_a(l, n)$ viene suddivisa in Q celle elementari, ciascuna con volume ΔV sufficientemente piccolo e caratterizzata da una resistività reale $\rho_q (q = 1, 2, \dots, Q)$.

Mediante l'espansione in serie di Taylor di $\rho_a(l, n)$ si ottiene:

$$\begin{aligned} \Delta\rho_a(l, n) &= \rho_a(l, n) - \rho_{a,0}(l, n) = \\ &= \sum_{q=1}^Q \frac{\partial \rho_a(l, n)}{\partial \rho_q} \Delta\rho_q + \sum (\text{derivate di ordine superiore}) \end{aligned} \quad (1)$$

dove $\Delta\rho_a(l, n)$ rappresenta la differenza tra la resistività apparente misurata $\rho_a(l, n)$ e una resistività apparente $\rho_{a,0}(l, n)$, calcolata nella stessa posizione (l, n) utilizzando un modello di riferimento che viene indicato con mod_0 . La differenza tra il valore della resistività nella q -esima cella e la resistività nella stessa cella calcolata utilizzando il mod_0 viene indicato con $\Delta\rho_q$.

Successivamente viene introdotta una funzione W definita come

$$W = \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N [\Delta\rho_a(l, n)]^2. \quad (2)$$

Il contributo principale W' relativo al primo ordine dell'espansione in serie di Taylor dell'equazione (2) è:

$$W' = \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N \Delta\rho_a(l, n) \sum_{q=1}^Q \frac{\partial \rho_a(l, n)}{\partial \rho_q} \Delta\rho_q. \quad (3)$$

Questa quantità può essere riscritta come:

$$W' = \sum_{q=1}^Q \Delta\rho_q \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N \Delta\rho_a(l, n) \mathfrak{I}_q(l, n) \quad (4)$$

avendo posto

$$\mathfrak{I}_q(l, n) = \frac{\partial \rho_{a,0}(l, n)}{\partial \rho_q} \quad (5)$$

Applicando la disuguaglianza di Schwartz ad una generica q -esima doppia sommatoria nell'equazione (5) si ottiene

$$\left[\sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N \Delta \rho_a(l, n) \mathfrak{I}_q(l, n) \right]^2 \leq \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N [\Delta \rho_a(l, n)]^2 \cdot \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N [\mathfrak{I}_q(l, n)]^2. \quad (6)$$

Dividendo ora la radice quadrata del termine a sinistra dell'equazione (6) per la radice quadrata del termine destro della disuguaglianza, viene introdotta la funzione

$$\eta_q = C_q \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N \Delta \rho_a(l, n) \mathfrak{I}_q(l, n), \quad (7)$$

dove la costante

$$C_q = \left\{ \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N [\Delta \rho_a(l, n)]^2 \cdot \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N [\mathfrak{I}_q(l, n)]^2 \right\}^{-1/2}. \quad (8)$$

La funzione η_q soddisfa le condizioni

$$-1 \leq \eta_q \leq +1 \quad (9)$$

e può essere interpretata come la probabilità che una anomalia di resistività, rispetto al mod_0 posizionata nella q -esima cella, sia responsabile dell'intero set delle resistività misurate. Valori positivi di questa funzione saranno relativi ad incrementi della resistività nella q -esima cella rispetto al valore di riferimento del mod_0 , mentre valori negativi saranno relativi a decrementi della resistività nella stessa cella ancora rispetto a quel valore di riferimento.

La funzione $\mathfrak{I}_q(l, n)$ della (5), viene detta “funzione scanner” poiché attraverso di essa si effettua, utilizzando una sorgente elementare di anomalia di resistività, una scansione del semispazio sottostante al piano di misura.

I valori della η_q che vengono calcolati rappresentano la probabilità che in quel punto sia situato il baricentro di un corpo con resistività diversa dal terreno che lo ospita.

Per calcolare i valori della probabilità è però necessario che alla $\mathfrak{I}_q(l, n)$ sia data una forma esplicita ed indipendente dai valori di resistività del grigliato di misura. Il modo per avere questo tipo di $\mathfrak{I}_q(l, n)$ è che il mod_0 sia scelto come semispazio omogeneo ed

isotropo. In questo caso, seguendo Loke & Barker (1995), si può determinare $\mathfrak{I}_q(l, n)$ analiticamente mediante le derivate di Frechet.

L'algoritmo appena descritto può essere utilizzato per generare sezioni che evidenziano le variazioni dei valori di probabilità in due dimensioni. Quando si confrontano le inversioni relative a due differenti profili possono nascere dei problemi a causa del fatto che si stanno comparando valori adimensionali che variano all'interno dello stesso intervallo numerico, anche in presenza di situazioni fisiche molto differenti. Se consideriamo ad esempio l'inversione di due profili, il primo relativo ad una situazione di sottosuolo elettricamente omogeneo, ma con deboli variazioni della resistività in regioni limitate e il secondo relativo ad una zona con più marcate variazioni della resistività, in entrambe si otterranno valori di probabilità che si avvicineranno a 1 o a -1, in corrispondenza rispettivamente delle anomalie positive o negative. Questi risultati simili nei valori, ma di significato diverso dal punto di vista fisico, rendono difficoltosa una corretta comparazione tra le sezioni poiché si può essere indotti ad assimilare quelle anomalie con valori delle probabilità affini, pur determinate da oggetti elettricamente molto diversi (Compare, 2007).

Per questo motivo, per i casi studio considerati in questa tesi, è stata utilizzata una variazione dell'algoritmo di inversione che elabora l'intero set di dati ottenuti dal grigliato di misura, invece che singoli profili. I risultati di queste elaborazioni sono mappe in cui si può osservare la distribuzione della probabilità di occorrenza delle anomalie a diverse profondità. Analogamente al caso bidimensionale, viene considerato il set di dati di resistività apparente, ma questa volta può provenire da un grigliato di misure anche non regolare. Per l' i -esimo profilo (con $i = 1, 2, \dots, N$) la funzione resistività apparente sarà descritta da $\rho^{a,i}(\vec{r})$, con \vec{r} che individua il punto a cui viene convenzionalmente attribuito il valore di resistività apparente. La funzione potenza sarà data da:

$$W = \sum_s \left[\Delta \rho^{a,i}(\vec{r}) \right]^2 \quad (10)$$

con $\Delta \rho^{a,i}(\vec{r})$ che rappresenta la differenza tra la funzione resistività apparente misurata e quella $\rho_0^{a,i}(\vec{r})$ calcolata rispetto al modello di riferimento mod_0 .

La funzione scanner questa volta verrà definita come:

$$\mathfrak{I}_q = \left. \frac{\partial \rho^{a,i}(\vec{r})}{\partial \rho_q} \right|_0 \quad (11)$$

e potrà essere calcolata come segue: se \vec{r}_{Ai} , \vec{r}_{Bi} , \vec{r}_{Mi} , \vec{r}_{Ni} individuano gli elettrodi A_i , B_i , M_i ed N_i nella configurazione generica dell' i -esimo sondaggio seguendo Loke & Barker (1995) la caduta di potenziale su M_i N_i dovuta ad una variazione infinitesima di resistività nel volume ΔV sarà data da:

$$\frac{\partial \phi}{\partial \rho_q} = \frac{\partial \phi_{A_i M_i}}{\partial \rho_q} - \frac{\partial \phi_{A_i N_i}}{\partial \rho_q} - \frac{\partial \phi_{B_i M_i}}{\partial \rho_q} + \frac{\partial \phi_{B_i N_i}}{\partial \rho_q} \quad (12)$$

con

$$\frac{\partial \phi_{UV}}{\partial \rho_q} = \frac{I \Delta V}{4\pi^2} \frac{(x_q - x_U) \cdot (x_q - x_V) + (y_q - y_U) \cdot (y_q - y_V) + (z_q - z_U) \cdot (z_q - z_V)}{\left[(x_q - x_U)^2 + (y_q - y_U)^2 + (z_q - z_U)^2 \right]^{3/2} \left[(x_q - x_V)^2 + (y_q - y_V)^2 + (z_q - z_V)^2 \right]^{3/2}} \quad (13)$$

dove $U=A_i$, B_i ; $V=M_i$, N_i , ed I è la corrente immessa nel sottosuolo.

La probabilità di occorrenza di anomalia di resistività, cioè la probabilità che un'anomalia di resistività presente nella q -esima cella sia la sorgente dell'insieme delle resistività misurate, analogamente al caso bi-dimensionale sarà definita da:

$$\eta_q(\vec{r}_q) = C_q \sum_S \Delta \rho^{a,i}(\vec{r}) \mathfrak{I}_q \quad (14)$$

dove \vec{r}_q individua la q -esima cella e

$$C_q = \left\{ \sum_S \left[\Delta \rho^{a,i}(\vec{r}) \right]^2 \cdot \sum_S \left[\mathfrak{I}_q \right]^2 \right\}^{-1/2}. \quad (15)$$

L'espressione ottenuta per la funzione scanner nell'equazione (11), come per il caso bi-dimensionale, non dipende dal valore della resistività del semispazio omogeneo di riferimento, ma è necessario scegliere un valore da assegnare alla resistività del mod_0 per poter calcolare la quantità $\Delta \rho^{a,i}(\vec{r})$. Per far sì che sia le anomalie positive che quelle negative abbiano un sufficiente contrasto rispetto alla resistività di riferimento, la scelta più opportuna è rappresentata dal valore medio delle resistività apparenti misurate.

Nel 2009 gli autori propongono un nuovo algoritmo per l'Inversione Tomografica della Resistività Elettrica basato sul calcolo Probabilistico (PERTI) e derivato dall'algoritmo RAOP. Quest'ultimo, anche se in grado di distinguere spazialmente massimi e minimi di resistività rispetto ad un modello di riferimento, la tomografia di probabilità è stata formulata in modo tale da escludere la diretta possibilità di fornire una stima della resistività intrinseca dei corpi bersaglio, distinguendosi così dai metodi deterministici più comunemente applicati. Nella geoelettrica *near-surface*, questo aspetto viene raramente considerato una grave carenza, poiché la determinazione delle resistività dei corpi sorgente in molte applicazioni non è così importante come la conoscenza della loro posizione e la forma. Molti set di dati sono stati interpretati con successo su questa base semi-quantitativa, ad esempio, nella prospezione archeologica. Per superare comunque tale limitazione, il nuovo metodo di inversione proposto ha lo scopo di fornire la resistività più probabile in un determinato punto del volume indagato. La premessa iniziale del metodo PERTI è che il modello di riferimento di resistività non sia più pre-assegnato ma che sia assunto essere il valore non noto ρ_m che corrisponde alla m-esima cella centrata in (x_m, y_m, z_m) .

$$\eta_m = C_m \sum_{n=1}^N (\rho_{a,n} - \rho_m) (\partial \rho_{a,n}^{ref} / \partial \rho_m)$$

Il fondamento logico della nuova inversione è che se in un punto (x_m, y_m, z_m) risulta $\eta_m = 0$, allora nella cella centrata a (x_m, y_m, z_m) la probabilità di trovare un aumento o diminuzione di resistività rispetto a ρ_m è zero. In altre parole in quella cella la resistività intrinseca non differisce da ρ_m .

Dunque poiché C_m è sempre diverso da zero, la condizione $\eta_m = 0$ porta a

$$\Delta \rho_{a,n} = \rho_{a,n} - \rho_{a,n}^{ref} \approx \sum_{m=1}^M (\partial \rho_{a,n}^{ref} / \partial \rho_m) \Delta \rho_m$$

che rappresenta la soluzione per l'applicazione del metodo PERTI. Per calcolare la resistività all'interno di V, punto per punto, basta solo cambiare rapidamente le coordinate (x_m, y_m, z_m) .

In conclusione la nuova procedura di inversione fornisce la resistività più probabile in qualsiasi punto del volume investigato come intesa come media ponderata dei dati di resistività apparente usando come pesi le derivate di Frechet dipendenti dalle coordinate del dato punto.

Principali peculiarità del nuovo metodo sono: (I) non necessità di informazioni a priori e, quindi, completo e senza vincoli di adattabilità dei dati, (II) diminuzione del tempo di calcolo, anche di due ordini di grandezza inferiore a quello richiesto dai software commerciali in complessi casi 3D utilizzando lo stesso PC, (III) inversione in tempo reale direttamente in campo, permettendo una rapida modifica del piano di indagine per meglio focalizzare gli obiettivi attesi, (IV) la totale indipendenza dalle tecniche di acquisizione dati e regolarità spaziali, (V) possibilità di essere usato come un ottimo modello d'inizio in processi iterativi standard di inversione al fine di accelerare convergenza.

Per spiegare le caratteristiche principali del Perti sono stati analizzati alcuni esempi di sintesi e i risultati Perti sono stati confrontati con quelli ottenuti dal software commerciali ERTLAB da Multi-Phase Technologies (www.mpt3d.com) e Geostudi Astier (www.geoastier.com), e RES2D/3DINV da Geotomo Software (www.geoelectrical.com), basati sull'approccio originale di Loke e Barker.

Nel primo esempio (*Figura 1*) viene considerato un modello 2D in cui abbiamo una struttura di 100 Ohm metri messo in contatto sia orizzontale che verticale con un materiale di 10 ohm metri. In questo materiale conduttivo è collocato un prisma orizzontale infinitamente lungo, largo 5 m, alto 2,4 e con 2 Ohm metri di resistività. Entrambe le strutture hanno la superficie superiore a 0,8 m di profondità. Un sondaggio DD con una distanza di 1m è simulato lungo una retta di 60m. La pseudosezione è stata contaminata da un rumore casuale del 5%.

E' evidente che la migliore risoluzione geometrica è ora fornita dal Perti e RES2DINV. Entrambi i metodi di inversione forniscono una sezione ragionevolmente conforme alla sezione originale, mentre l'algoritmo ERTLAB non risponde in modo soddisfacente per quanto riguarda la definizione della struttura a sinistra. E' possibile notare la tendenza di RES2DINV a sollevare la parte inferiore del blocco conduttivo poco sopra la vera profondità. Il software RES2DINV non ha permesso l'inversione di essere eseguito sotto 3 metri di profondità. In questo caso l'algoritmo di Perti appare essere quella che meglio si avvicina la sezione vero.

Il secondo esempio (*Figura 2*) rappresenta una struttura a due strati in cui è considerato un primo strato di 20m di spessore con resistività di 300 Ohm metro ricopre un substrato resistivo con resistività di 1000 Ohm m. Poi una diga verticale, solo 5 metri di

larghezza e con resistività di 10 Ohm metro, è stata posta all'interno del substrato. Un sondaggio DD con una distanza di 5m è simulato lungo un profilo di 295m. La pseudosezione è ancora una volta corrotta da un rumore casuale del 5%. L'algoritmo Perti fornisce una soluzione geometrica che appare conforme alla sezione vera, anche se con una rappresentazione eccessivamente grande della diga, che è, però, molto simile a quella che figura nelle sezioni ERTLAB e RES2DINV. Questi ultimi due approcci mostrano la tendenza ad immaginare le due porzioni del substrato, su entrambi i lati della diga, come due blocchi separati lateralmente, mentre Perti fornisce una migliore immagine della sequenza a due strati.

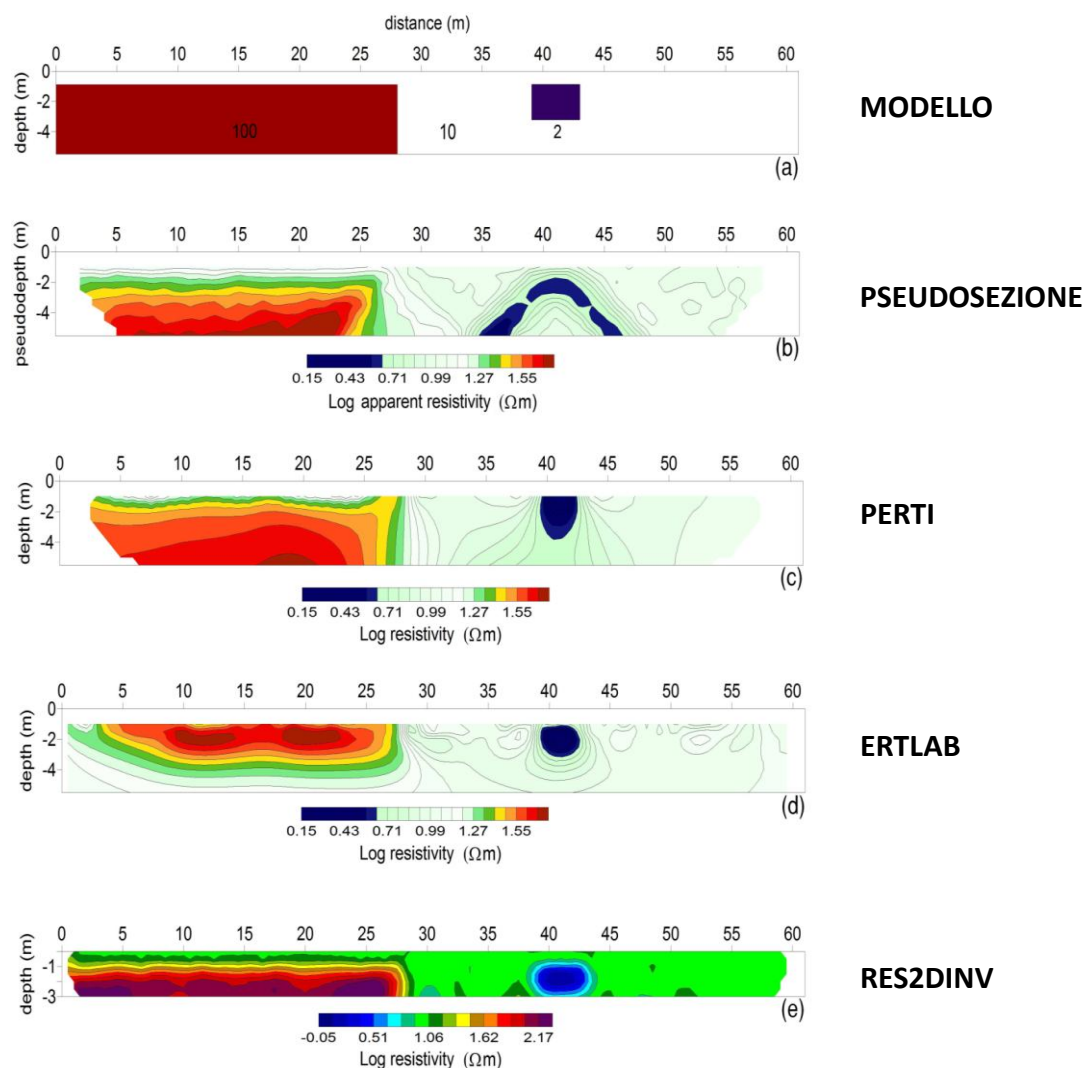


Figura 1 - Confronto tra : a) modello sintetico; b) pseudosezione di resistività apparente; c) inversione di probabilità; d)-e) inversione deterministica (immagine da Mauriello – Patella 2009)

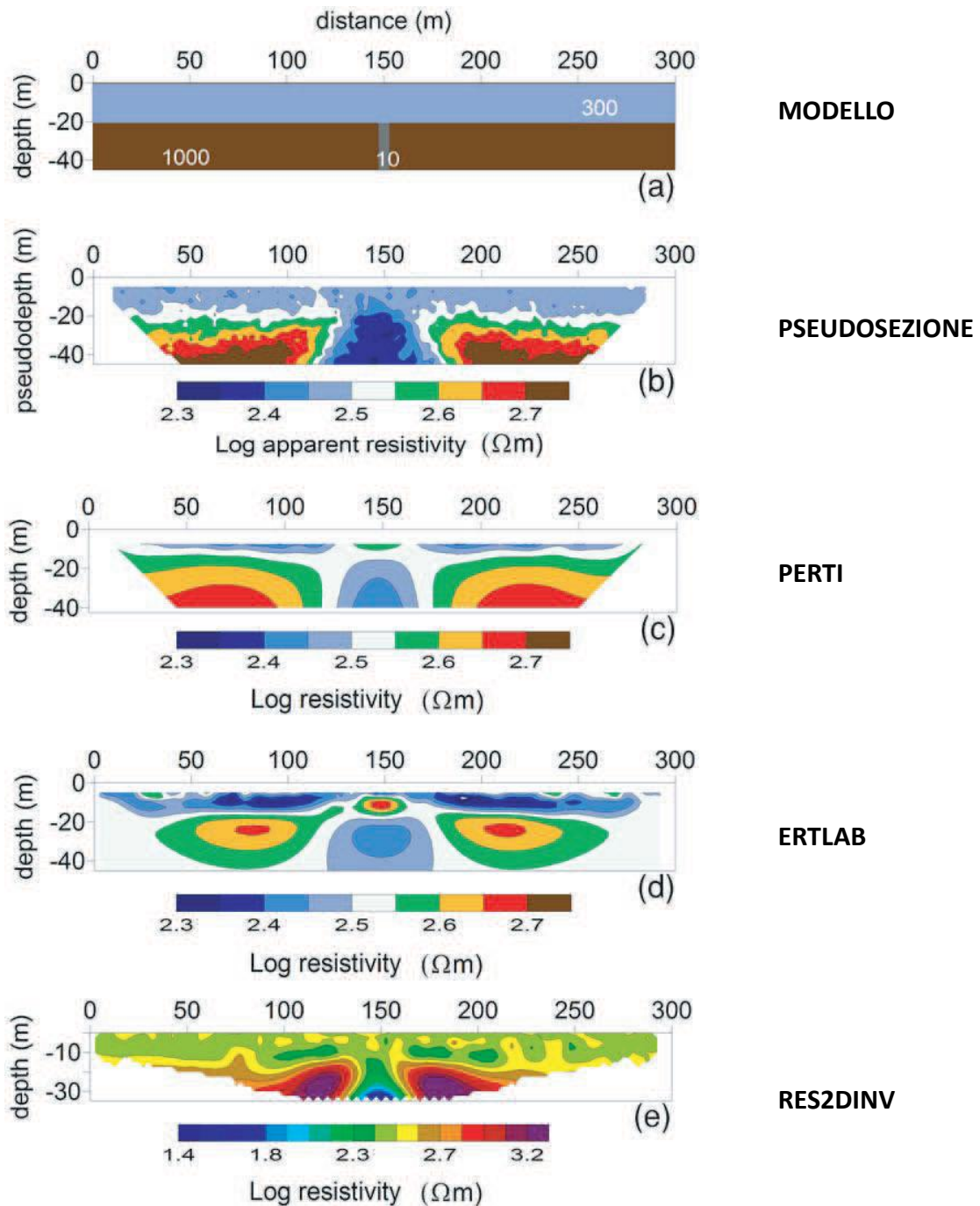


Figura 2 - Confronto tra : a) modello sintetico; b) pseudosezione di resistività apparente; c) inversione di probabilità; d)-e) inversione deterministica (immagine da Mauriello – Patella 2009).

Per concludere questa sezione, studiamo ora le risposte di un modello 3D (Figura 3). Il modello si propone di simulare una struttura archeologica sepolta costituita da una sequenza di muri disposti ad angolo retto, di delimitazione due stanze adiacenti, ognuna con proprio ingresso. La struttura in muratura è posta tra 0,7 e 1,6 m di profondità ed è

ha resistività di 150 Ohm m, in contrasto con di 50 Ohm m con lo spazio che la ingloba. E' simulata una serie di sondaggi DD paralleli all'asse x con distanza dipolare di 1m dipolo e distanziati tra loro di 1m.

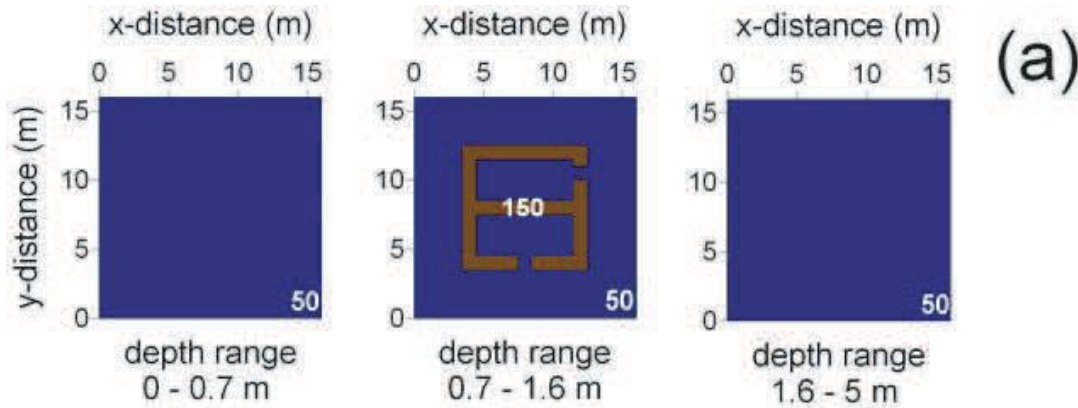


Figura 3 – Esempio di applicazione ad una struttura archeologica (immagine da Mauriello – Patella 2009).

Le slice del Perti, ERTLAB e RES3DINV (Figura 4) sono state realizzate alle profondità di 1, 1.5, 2 e 2.5m. Tutti i tre algoritmi forniscono una corretta definizione laterale della struttura muraria. Tuttavia, il Perti e ERTLAB sembrano fornire la migliore collocazione in profondità della struttura in muratura, conforme al modello iniziale, mentre il software RES3DINV mostra alcune difficoltà nel chiudere la parte inferiore delle pareti ad una profondità adeguata. Per quanto riguarda gli ingressi alle due sale, l'algoritmo Perti sembra essere quello che fornisce il corretto posizionamento dei due ingressi.

In casi 3D, cioè insiemi di dati molto più pesanti di casi 2D, il calcolo del tempo diventa il criterio principale per la selezione tra i metodi di inversione con una uguale risoluzione. In tal caso, il tempo richiesto dall'algoritmo Perti utilizzando un normale PC è stato solo di circa 3 minuti, di gran lunga inferiore al tempo richiesto dal software ERTLAB (più di 250 min) e la versione demo RES3DINV (circa 30 min).

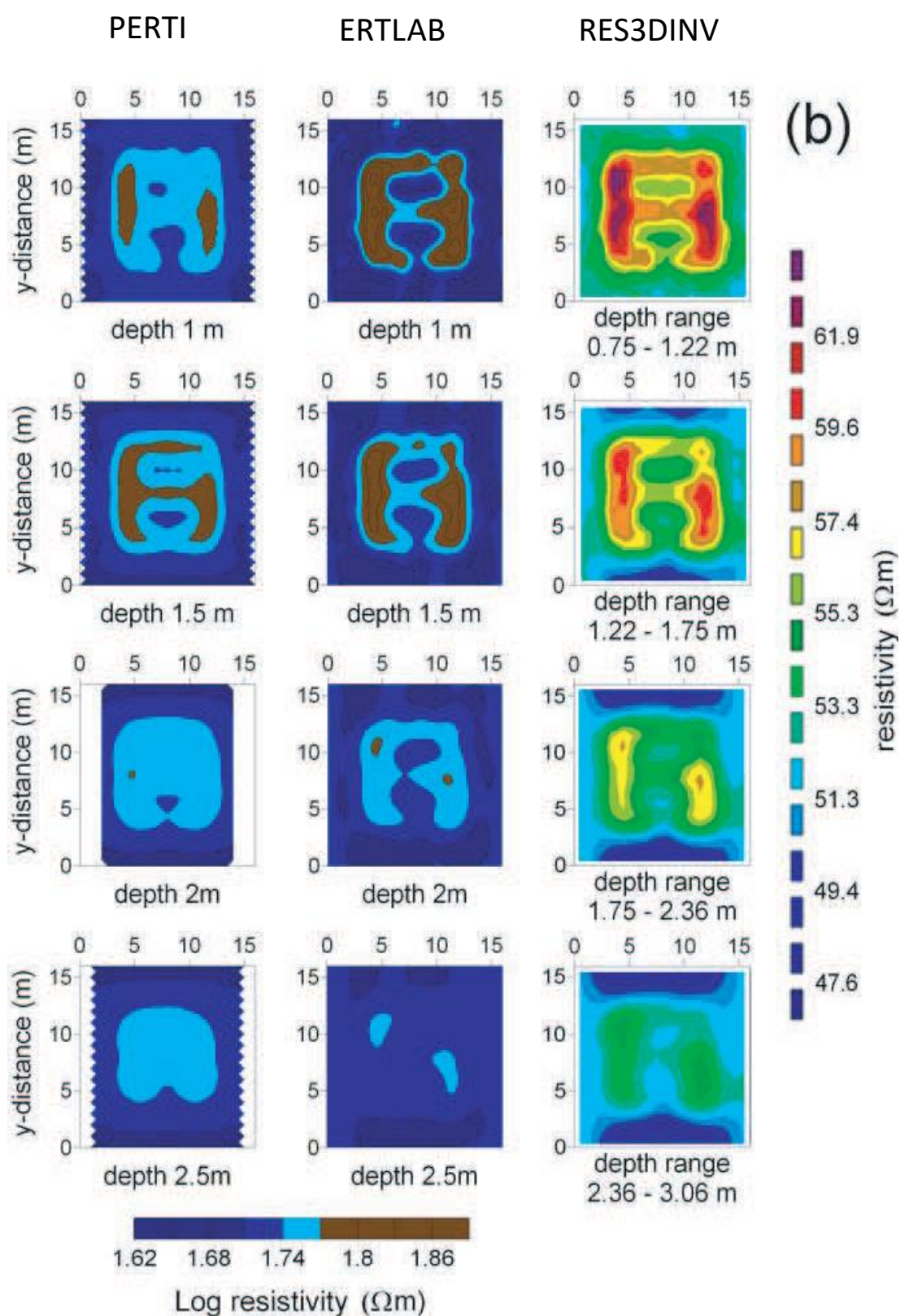


Figura 4 – Analisi comparativa dei vari modelli Perti, ERTLAB e RES3DINV (immagine da Mauriello – Patella 2009).

Conclusioni

Il lavoro svolto durante questi tre anni di ricerca, ha avuto l'obiettivo principale di capire e dimostrare come l'uso delle moderne tecniche di diagnostica geofisica e di rilevamento tridimensionale offrono sempre di più la possibilità di usufruire di diversi strumenti non invasivi nel settore dei Beni Culturali, in merito ai progetti di salvaguardia, tutela, valorizzazione, divulgazione, didattica, conservazione e prevenzione del patrimonio culturale. Avendo una formazione prettamente archeologica, ho avuto la possibilità di entrare nel merito della questione, comprendere ed affrontare le problematiche che presentano le diverse metodologie e gli opportuni software utilizzati, studiare e capire i processi legati alla restituzione, alla interpretazione e lettura delle informazioni; ovviamente tutto ciò è stato possibile solo grazie a numerose ore di lavoro svolte sul campo (per l'acquisizione dei dati) e in laboratorio (per la gestione dei dati).

Nella presente ricerca è stato proposto un approccio multidisciplinare per lo studio del parco archeologico di Egnazia che ha previsto l'applicazione della tomografia elettrica e delle più moderne tecniche di rilievo tridimensionale, al fine di restituire delle costruzioni di modelli 3D del sottosuolo investigato e delle strutture presenti nel sito.

In particolare i dati acquisiti con la geoelettrica sono stati trattati con un metodo probabilistico di inversione tomografica tridimensionale di resistività elettrica, al fine di evidenziare meglio la forma, l'articolazione e la profondità delle possibili strutture sepolte. Diversi saggi di scavo sono stati programmati ed effettuati in base alle indicazioni delle mappe tomografiche: gli elementi portati in luce, infatti, hanno confermato quanto ipotizzato ed interpretato durante la fase di restituzione del dato; inoltre, sovrapponendo le mappe di resistività con il rilievo archeologico, si ha avuto sempre una corrispondenza tra la posizione delle anomalie con quella delle strutture. Oltre a ciò, per le anomalie più significative è stato possibile approfondire la conoscenza del loro sviluppo nel sottosuolo, grazie all'opportunità di riconoscere, separare e ricostruire bidimensionalmente e tridimensionalmente elementi strutturali altrimenti non accessibili. In tal modo l'analisi svolta ha fornito indicazioni oggettive grazie alle quali è stata fatta una definizione accurata delle strutture sepolte adoperando modelli elaborati a partire da informazioni acquisite dalla superficie.

Da sottolineare che la medesima metodologia è stata adoperata in altri casi studio, i cui risultati sono riportati nell'ultimo capitolo: anche in questi casi è stata dimostrata la validità del metodo adoperato e l'efficacia del loro potere risolutivo in diversi contesti. Per quanto riguarda il rilievo tridimensionale effettuato all'interno del complesso termale dell'antica città, sono state adoperate le tecniche del laser scanner e della fotogrammetria. Per ogni metodologia sono stati studiati i principi di funzionamento ed i vari processi di elaborazione e restituzione dei dati, cercando di capire i vantaggi e gli svantaggi della loro applicabilità in campo archeologico, ma soprattutto le potenzialità offerte nel caso di un uso separato o integrato delle stesse. Connesso a questo studio è stato senz'altro l'obiettivo che si è voluto raggiungere e il tipo e la qualità del prodotto finale, pertanto è stata necessaria la conoscenza di opportuni software di elaborazione e restituzione delle informazioni acquisite sul campo. A tal proposito, sono state effettuate numerose prove al fine di capire la qualità e la quantità dei prodotti estraibili dal modello finale, con lo scopo di poter fornire il maggior numero di elementi per rendere quanto più esaustiva possibile la "rappresentazione" delle terme e fornire un quadro generale delle stesse.

Ringraziamenti

Il Dottorato di ricerca è stato un percorso impegnativo che ha richiesto continui impegni intellettuali e fisici, ma soprattutto è stata un'esperienza formativa durante la quale mi sono messa costantemente in gioco.

Al termine di questi tre anni di dottorato desidero ringraziare tutte le persone che a vario titolo hanno contribuito alla realizzazione di questo lavoro di tesi.

Innanzitutto voglio ringraziare il mio relatore, il Prof. Agostino Catalano, che con la sua professionalità ha sempre seguito e sostenuto questo progetto di ricerca, consigliandomi e fornendomi importanti spunti di riflessione.

Ringrazio la Prof.ssa Marilena Cozzolino che mi ha saputo appassionare e coinvolgere nello studio di queste nuove discipline, per essersi dimostrata sempre paziente e disponibile a offrirmi ogni tipo di chiarimento durante tutte le fasi del mio lavoro, per essersi prodigata a far sì che potessi fare esperienze costruttive e utili.

Un ringraziamento particolare va al Prof. Paolo Mauriello, Direttore dell'ITABC - CNR, per la possibilità concessami di collaborare con l'Istituto per le Tecnologie Applicate ai Beni Culturali, nonché al Dott. Roberto Gabrielli, ricercatore presso il medesimo Istituto, permettendomi di imparare e utilizzare le strumentazioni ed i *softwares* necessari per l'acquisizione e per l'elaborazione dei dati inerenti al rilievo tridimensionale.

Ringrazio l'Università degli Studi del Molise per avermi permesso di utilizzare la strumentazione per l'acquisizione dei dati geofisici, e Il Dott. Vincenzo Gentile per l'aiuto nelle fasi di acquisizione dei dati in campagna.

Infine, ringrazio la Prof.ssa Raffaella Cassano dell'Università di Bari per aver permesso una collaborazione con la sua equipe di ricerca utile per una corretta conoscenza del parco archeologico di Egnazia e per programmare le fasi di lavoro.

Bibliografia

AGRIMI A. – ALFONSO C. 2014, *Porti e Approdi*, CERAUDO G. (a cura di) *Archeologia delle Regioni d'Italia*, Collana diretta da Sergio Rinaldi Tufi, Puglia, pp. 248-270.

AITKEN M.J. 1974, *Physics and archaeology*, 2nd edition. Oxford: Claredon Press, p. 286.

ALAIA R. - PATELLA D. - MAURIELLO P. 2008, *Application of the geoelectrical 3D probability tomography in a test-site of the archaeological park of Pompei (Naples, Italy)*, *Journal of Geophysics and Engineering*, 5, pp. 67-76, doi: [10.1088/1742-2132/5/1/007](https://doi.org/10.1088/1742-2132/5/1/007).

ANGELINI A. – COLOSI F. – GABRIELLI R. 2007, *Tecniche speditive per la ricostruzione tridimensionale dell'area archeologica di Villa Magna*, *Archeologia e Calcolatori*, 18, pp. 141-158.

ARRIGHETTI A. – CAVALIERI M. 2012, *Il rilievo fotogrammetrico per nuvole di punti RGB della "sala triabsidata" del sito archeologico di Aiano-Torraccia di Chiusi (SI)*, *Archeologia e Calcolatori*, 23, pp. 121-133.

ASTIER J.L. 1971, *Geophysique Appliquée à l'hydrogéologie*, Masson & Cie.

AURIEMMA R. 2004, *Archeologia subacquea nella Puglia meridionale*, in GIACOBELLI M. (a cura di) 2004, *Lezioni Fabio Faccenna: conferenze di archeologia subacquea, III-V ciclo*, pp. 11-24.

BERNABINI M. - BRIZZOLARI E. - MONNA D. - PADULA G. - PIRO S. - VERSINO L. 1985, *Individuazione di cavità sepolte mediante prospezione geoelettrica. Esempio di applicazione: ricerca di tombe nella necropoli di Colle del Forno nei pressi di Montelibretti (Roma)*. Bollettino del Servizio Geologico d'Italia, CIII, pp. 67-79.

BIANCHINI M. 2008, *Manuale di rilievo e di documentazione digitale in archeologia*.

BORNAZ L. – LINGUA A. – RINAUDO F. 2002, *Il trattamento dei dati laser scanner nelle applicazioni terrestri*, estratto da internet: www.researchgate.net/publication/235791299.

BOSCHI F. 2009, *5.1. Introduzione alla geofisica per l'archeologia*, in GROMA 2, estratto da www.academia.edu, pp. 291-314.

CAMMARANO F. - DI FIORE B. - MAURIELLO P. - PATELLA D. 2000, *Examples of application of electrical tomographies and radar profiling to cultural heritage*, *Annali di Geofisica*, vol.43, No.2, pp. 309-324.

CAMMARANO F. - MAURIELLO P. - PATELLA D. - PIRO S. 1997a, *Integrated geophysical methods for archaeological prospecting*, in *Volcanism and archaeology in Mediterranean sea*, pp. 7-34.

CAMMARANO F. - MAURIELLO P. - PIRO S. 1998, *High resolution geophysical prospecting with integrated methods. The case of ancient Acropolis of Veio (Rome, Italy)*, *Archaeological Prospecting* vol.4, pp. 157-164.

CARABELLI E. 1967, *Ricerca sperimentale dei dispositivi più adatti alla prospezione elettrica di cavità sotterranee*. *Prospezioni Archeologiche*, 2, pp. 9-21.

CASSANO R. – FIORIELLO C. S. – MANGIATORDI A. – MASTROCINQUE G. 2010, *Urbanistica, economia e società a Egnazia tra la fine del IV e il V sec.*, in COLANGELO A. – PELLACCHIA D. – STIGLIANO A. (a cura di) *Potere e politica nell'età della famiglia teodosiana (395-455)*. Testo su supporto digitale 2010, pp. 267-280.

CASSANO R. - FIORIELLO C. S. 2009, *Percorsi di Storia, Itinerari informativi nel territorio di Fasano*.

CASSANO R. 2008-2009, *Egnazia tardo-antica: il vescovo protagonista della città*, in *Rendiconti della Pontificia Accademia Romana di archeologia*, vol. LXXXI 2008-2009, pp. 15-37.

CASSANO R. 2009, *La vicenda urbana di Egnazia ridisegnata dalle recenti indagini*, *Journal of Fasti Online*: www.fastionline.org/docs/FOLDER-it-2009-161.pdf.

CASSANO R. et alii 2007, *Ricerche archeologiche nella città di Egnazia. Scavi 2004-2006: relazione preliminare*, PANI M. (a cura di) *Epigrafia e territorio, politica e società, Temi di antichità romane VIII*, Bari 2007, pp. 7-132.

CAVALIERI M. – VALCARENGHI G. – NOVELLINI A. 2009, *Il rilievo fotogrammetrico: un metodo alternativo di documentazione dello scavo archeologico di Aiano-Torraccia di Chiusi (SI)*, tratto da www.fastionline.org.

CERAUDO G. 2014, *Archeologia delle Regioni d'Italia*, Bologna.

CLARK A. J. 1986, *Archaeological geophysics in Britain*, *Geophysics*, 51, pp. 1404-1413.

COARELLI F. - LA REGINA A. 1984, *Abruzzo - Molise*, *Guide archeologiche Laterza*, Bari, pp. 127-131.

COMPARE V. 2007, *Applicazione di una metodologia geoelettrica per la ricerca archeologica. Tesi di dottorato in Ambiente e Territorio, XX ciclo, Università degli Studi del Molise*.

CONSTABLE S. C. - PARKER R. L. - CONSTABLE C. G. 1987, *Occam's Inversion: a practical algorithm for generating smooth models from EM sounding data*. *Geophysics*, 52, 289–300.

CONYERS L. - GOODMAN D. 1997, *Ground-Penetrating Radar*, in *Introduction for Archaeologists*. AltaMira, Walnut Cred.

COSENTINO P. - LUZIO D. - MARTORANA R. - TERRANOVA L. 1995, *Tomographic techniques for pseudo-section representation*, in *Proceedings of the 1st Meeting of Environmental and Engineering Geophysical Society*, pp. 485–488, Turin, Italy.

COSENTINO P. - LUZIO D. - MARTORANA R. 1998, *Tomographic resistivity 3D mapping: filter coefficients and depth correction*, in *Proceedings of the 4th Meeting of Environmental and Engineering Geophysical Society*, pp. 279–282, European Section, Barcelona, Spain.

COSENTINO P. - LUZIO D. 1997, *Tomographic pseudo-inversion of resistivity profiles*, *Annali di Geofisica*, vol. 40, no. 5, pp. 1127–1144.

COZZOLINO M. - DI GIOVANNI E. - MAURIELLO P. - VANNI DESIDERI A. - PATELLA D. 2012, *Resistivity tomography in the Park of Pratolino at Vaglia (Florence, Italy)*. *Archaeological Prospection*. (www.interscience.wiley.com), DOI: 10.1002/arp.1432.

COZZOLINO M. - MAURIELLO P. - PATELLA D. 2013, *Resistivity Tomography Imaging of the substratum of the Bedestan Monumental Complex at Nicosia, Cyprus*. *Archaeometry*. (www.interscience.wiley.com), DOI: 10.1111/arp.12018.

CROSILLA F. – BEINAT A. 2000, *Applicazioni dell'analisi procustiana alla trasformazione di dati in ambiente GIS*, catalogo di Ateneo unifi.

CUNDARI C. 1982, *Fotogrammetria architettonica*, Roma, Edizioni Kappa.

D'ANDREA A. 2008, *Gli Standard nell'archeologia preventiva*, in D'ANDREA A. – GUERMANDI M. P. (a cura di), *Strumenti per l'archeologia preventiva: esperienze, normative e tecnologie*, Budapest, pp. 95-106.

DABAS M. 2009, *Theory and practice of the new fast electrical imaging system ARP*, in CAMPANA S. - PIRO, S. (dir.). *Seeing the Unseen*, Taylor and Francis Group, London, 105-126.

DE CARO 2008, *Archeologia preventiva, lo stato della materia*, in D'ANDREA A. – GUERMANDI M. P. (a cura di), *Strumenti per l'archeologia preventiva: esperienze, normative e tecnologie*, Budapest, pp. 11-20.

DE GROOT - HEDLIN C. - CONSTABLE S. 1990, *Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models form magnetotelluric data*. *Geophysics*, 55, 1613-1624.

DEL MONTE R – RANDINO V. 2014, *Egnatia*, CERAUDO G. (a cura di) *Archeologia delle Regioni d'Italia, Collana diretta da Sergio Rinaldi Tufi, Puglia*, pp. 303-309.

DEY A. - MORRISON H.F. 1979a, *Resistivity modelling for arbitrarily shaped two-dimensional structures*, *Geophysical Prospecting*, **27**, pp. 106–136.

DI FIORE B. - MAURIELLO P. - MONNA D. - PATELLA D. 2002, *Examples of application of tensorial resistivity probability tomography to architectonic and archaeological targets*, *Annali di Geofisica*, **45**, n.2, pp. 417-430.

FAJKLEWICZ A. - GLINSKI A. - SLIZ, J. 1982, *Some applications of the underground tower gravity vertical gradient*. *Geophysics*, **47**, pp. 1688-1692.

FIGURELLA 2007, *Saggio IV. L'area della basilica episcopale*, in CASSANO R. et alii 2007, *Ricerche archeologiche nella città di Egnazia. Scavi 2004-2006: relazione preliminare*, Pani M. (a cura di) *Epigrafia e territorio, politica e società, Temi di antichità romane VIII*, Bari 2007, pp. 93-118.

GERARD R. - TABBAGH A. 1991, *A mobile four electrodes array and its application to electrical survey of planetary grounds at shallow depths*. *J. Geophys. Res.*, **96 (B-3)**, pp. 4117-4123.

GIRARDI S. – CAVULLI F. – VOLTOLINI F. – RIZZI A. – REMONDINO F. – PEDROTTI A. – GONZO L. 2015, *Laser scanner e fotografia digitale per la modellazione e l'analisi di siti archeologici: il caso studio del Riparo Gabani I*, estratto da internet: www.researchgate.net/publication/237763901, pp. 1-6.

GIUFFRIDA A. – LIUZZO M. – SANTAGATI C. – ANDREOZZI L. 2015, *Il laser scanner per il rilevamento delle opere archeologici. Le terme dell'Indirizzo a Catania*, estratto da internet: www.researchgate.net/publication/252068338.

GIULIANI R. 2010, *Città e territorio nella Puglia centro-settentrionale fra IV e V secolo: persistenze e trasformazioni degli assetti insediativi e dei quadri socio-economici*, in COLANGELO A. – PELLACCHIA D. – STIGLIANO A. (a cura di) *Potere e politica nell'età della famiglia teodosiana (395-455)*. Testo su supporto digitale 2010, pp. 329-355.

KOLENDO J. - PRZENIOSLO J. - ICIEK A. - JAGODZINSKI A. - TALUC S. - PORZEZYNSKI S. 1973, *Geophysical prospecting for the historic remains of Carthage*, Tunisia.

KURAS O. 2002, *The Capacitive Resistivity Technique for Electrical Imaging of the Shallow Subsurface*, Phd Thesys, University of Nottingham,.

LA PENNA V. - MASTRANTUONO M. - PATELLA D. - DI BELLO G. 1992, *Magnetic and geoelectric prospecting in the archaeological area of Selinunte (Sicily, Italy)*. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, XXXIV, pp. 133-143.

LA REGINA A. 1989, Italia. *Omnium terrarum parents*; A. LA REGINA, Centri fortificati preromani nei territori sabellici dell'Italia centrale adriatica, Colloque International "Agglomerations fortifiees illyriennes", Mostar 24-26 Octobre 1974, Sarajevo 1975, pp. 271-282.

LATTANZI E. 1970, "Intervento", in *Atti dell'VIII Convegno Internazionale di Studi sulla Magna Grecia* (Taranto 1968), Napoli, pp. 227-228

LATTANZI E. 1972, *La nuova basilica paleocristiana di Egnazia*, in *VeteraChr* 9, pp. 143-150.

LERICI C. M. 1969, *La prospezione archeologica*, in *Le Scienze*, n. 5, anno II, vol.I, pp. 13-23.

LINES L.R. - TREITEL S. 1984, *Tutorial. A review of least-squares inversion and its application to geophysical*. *Geophysical Prospecting* 32, pp. 159-186.

LININGTON, R.E. 1966, *Test use of a gravimeter on Etruscan chamber tombs at Cerveteri*. *Prospezioni Archeologiche* 1, pp. 37-41.

LOKE M.H. - BARKER R.D. 1996, *Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method*, in *Geophysical Prospecting*, 44, pp. 131-152.

LOKE M.H. 2004, *Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys*. <http://www.geoelectrical.com> (PDF).

MANGIATORDI 2007, *Saggio II. Il quartiere produttivo a S della via Traiana*, in CASSANO R. et alii 2007, *Ricerche archeologiche nella città di Egnazia. Scavi 2004-2006: relazione preliminare*, PANI M. (a cura di) *Epigrafia e territorio, politica e società, Temi di antichità romane VIII*, Bari, pp. 66-92.

MARESCOT L. - LOPES S. P. - RIGOBERT S. - GREEN A. G. 2008, *Nonlinear inversion of geoelectric data acquired across 3D objects using a finite-element approach*, *Geophysics*, vol. 73, no. 3, pp. F121-F133.

MARTORANA R. - CAPIZZI P. 2014, *A Fast Imaging Technique Applied to 2D Electrical Resistivity Data*, *International Journal of Geophysics*, Volume 2014, Article ID 846024, <http://dx.doi.org/10.1155/2014/846024>.

MASTROCINQUE 2007, *Saggi I e V. L'area della piazza porticata*, in CASSANO R. et alii 2007, *Ricerche archeologiche nella città di Egnazia. Scavi 2004-2006: relazione preliminare*, PANI M. (a cura di) *Epigrafia e territorio, politica e società, Temi di antichità romane VIII*, Bari, pp. 46-66.

MASTROCINQUE G. 2014, *Spazio residenziale e spazio produttivo ad Egnazia (Fasano - BR) in età tardo antica*, in PENSABENE P. - SFAMENI C. (a cura di) *La villa restaurata e i nuovi studi sull'edilizia residenziale tardoantica*, Atti del convegno

internazionale del Centro Interuniversitario di Studi sull'Edilizia abitativa tardo antica nel Mediterraneo (CISEM) (Piazza Armerina 7-10 novembre 2012), pp. 415-426.

MAURIELLO P. - MONNA D. - PATELLA D. 1998, *3D geoelectrical tomography and archaeological applications*, *Geophysical Prospecting*, vol. 46, no. 5, pp. 543-570.

MAURIELLO P. - PATELLA D. 1999a, *Resistivity anomaly imaging by probability tomography*, *Geophysical Prospecting*, vol. 47, no. 3, pp. 411-429.

MAURIELLO P. - PATELLA D. 1999b, *Imaging 3D structures by resistivity probability tomography*, in *Proceedings of the 61st EAGE Conference and Technical Exhibition*, Helsinki, Finland, June.

MAURIELLO P. - PATELLA D. 2009, *A data-adaptive probability-based fast ERT inversion method*, *Progress in Electromagnetics Research*, vol.97, pp. 275-290, doi: 10.2528/PIER09092307.

MAURIELLO P. 2002, *La tomografia geoelettrica nella zona tra il Foro e le mura settentrionali*. In *Nuove forme di intervento per lo studio del sito antico di Cuma*, Ed. B. D'Agostino.

MENKE W 1989, *Geophysical data analysis: Discrete Inverse Theory*, 2° ed. San Diego, Academic Press.

MORCIANO M. 2014, *Assetti urbanistici*, CERAUDO G. (a cura di) *Archeologia delle Regioni d'Italia*, Collana diretta da Sergio Rinaldi Tufi, Puglia, pp. 271-279.

MUSMECI F.- RIZZO S. 2004, *Elettronica ed informatica nella geofisica. Un metodo tridimensionale per l'interpretazione diretta dei metodi geoelettrici*, pp.543-556.

OAKLEY S. P. 1995, *The Hillforts of the Samnites*, *Archaeological Monographs of the British School at Rome*, 10, pp. 109-110.

ORLANDO L. - PIRO S. - VESINO L. 1987, *Location of subsurface geoelectric anomalies for archaeological work: a comparison between experimental arrays and interpretation using numerical methods*. *Geoexploration*, 24, pp. 227-237.

PANISSOD C. - DABAS M. - HESSE A. - JOLIVET A. - TABBAGH J. - TABBAGH A. 1998, *Recent developments in shallow depth electrical and electrostatic prospecting using mobile arrays*. *Geophysics*, 65, pp. 1542-1550.

PANELLA C. - GABRIELLI R. - GIORGI C. 2011, *Le "terme di Elagabalo" sul Palatino: sperimentazione di un metodo fotogrammetrico 3D applicato allo scavo archeologico*, *Archeologia e Calcolatori*, 22, pp. 243-260.

PARASNIS D.S. 1997, *Principles of applied geophysics*. Chapman & Hall - London.

PATELLA D. 1978, *Application of geoelectric dipolar techniques to the study of an underground natural cavity of archaeological interest*. Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata, XXI, pp. 23-34.

PELOSO D. 2005, *Tecniche laser scanner per il rilievo dei beni culturali*, Archeologia e Calcolatori 16, pp. 199-224.

PIDLISECKY A. - HABER E. - KNIGHT R. 2007, *RESINVM3D: a 3D resistivity inversion package*, Geophysics, vol. 72, no. 2, pp. H1-H10.

PIRO S. 2003, *Integrazione di metodi geofisici ad alta risoluzione per l'indagine nei siti archeologici*, pp. 1-17.

RIZZO E. – GIAMPAOLO V. 2013, *Tecniche geofisiche per il monitoraggio ambientale*, in Atti del Congresso, pp.261- 273.

RUSSO M. – GUIDI C. 2011, *Principali tecniche e strumenti per il rilievo tridimensionale in ambito archeologico*, Archeologia e Calcolatori, 22, pp. 169-198.

SASAKI Y. 2006, *3-D resistivity inversion using a subspace method*, Geophysical Exploration, vol. 59, no. 5, pp. 425–430.

SCOLLAR I. - TABBAGH A. - HESSE A. - HERZOG I. 1990, *Archaeological Prospecting and Remote sensing*, Cambridge University Press, Cambridge, England.

SGRENZAROLI M. – VASSENZA G.P.M. 2007, *Tecniche di rilevamento tridimensionale tramite laser scanner*.

SHIMA H. - SAKASHITA S. - KOBAYASHI T. 1996, *Developments of non-contact data acquisition techniques in electrical and electromagnetic explorations*. Journal of Applied Geophysics, 35, pp. 167-173.

SILVESTER P.P. - FERRARI R.L. 1990, *Finite elements for electrical engineers (2nd. ed.)*. Cambridge University Press.

STAZIO A. 1965, *La documentazione archeologica in Puglia*, in Atti Taranto IV (1964), pp. 153-179.

TELFORD W. M. - GELDART L.P. - SHERIFF R.E. - KEYS D.A. 1976, *Applied Geophysics*. Cambridge. University Press.

TERZANI C. - DE BENEDITTIS G. 2005, *Complesso monumentale di Casalpiano a Morrone del Sannio*.

TORO B. – DI FILIPPO M. 1999, *Caratteri fisiografici del territorio- Rilievo gravimetrico*, in SCHNEIDER E. (a cura di) *Elaiussa Sebaste I: campagne di scavo 1995-1997*, pp. 13-26.

VALCHERA A. 2014, *Città e territorio*, CERAUDO G. (a cura di) *Archeologia delle Regioni d'Italia, Collana diretta da Sergio Rinaldi Tufi, Puglia*, pp. 101-121.

WEYMOUTH J .W. 1986, *Geophysical methods of archaeological site surveying*, in *Advances in Archaeological Methods and Theory*, 9, pp. 311-395.